

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

Tiago Lemos Guedes

**TRATAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA ATRAVÉS DE
MICROFILTRAÇÃO TANGENCIAL**

Florianópolis
2012

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Guedes, Tiago Lemos Guedes

Tratamento de água de chuva através de microfiltração tangencial [dissertação] / Tiago Lemos Guedes ; orientador, Flávio Rubens Lapolli ; co-orientadora, Maria Eliza Nagel Hassemer. - Florianópolis, SC, 2012.

98 p. ; 21cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. aproveitamento de água de chuva. 3. microfiltração tangencial. I. Lapolli, Flávio Rubens. II. Hassemer, Maria Eliza Nagel. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

Tiago Lemos Guedes

**TRATAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA ATRAVÉS DE
MICROFILTRAÇÃO TANGENCIAL**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia
Ambiental da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de mestre em Engenharia Ambiental
Orientador: Prof. Dr. Flávio Rubens Lapolli
Co-orientador: Prof. Dr. Maria Eliza Nagel Hassemer

Florianópolis
2012

AGRADECIMENTOS

À Deus pela dádiva da vida e pela saúde que me permite continuar;

Aos meus familiares pelo incentivo, apoio incondicional, carinho e vibrações positivas emanadas;

Ao Professor Flávio Rubens Lapolli pela oportunidade do mestrado, por propiciar as condições necessárias para a realização desta pesquisa e pela orientação;

À Professora Maria Elisa Nagel Hassemer pelo auxílio e co-orientação neste trabalho;

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) pelo suporte para o desenvolvimento da pesquisa;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de estudos concedida, a qual propiciou meu sustento por dois anos;

Ao bolsista Eduardo pelo suporte na realização dos ensaios e análises;

Aos meus amigos com os quais dividi casa nessa fase de minha vida: Pedro Hilgert, Lolita Sala, Karoline Fendel, João Henrique, Deco, Cecília Prompt, Fabrício Brandão, Marina Cenovicz, Deise Nardi e Raphael Autran. Agradeço pelo companheirismo, força e palavras de incentivo;

À todos meus amigos que se fizeram presentes durante este período, fisicamente ou em intenção. Grato por este sentimento da amizade que fortalece o caminho.

Aos meus colegas de laboratório, Raphael Tarpani, Jossy Bernadelli, Tiago Belli, Lucila Coral, Marie Cherry, Cristiane Folzke e Marcelo Bueno, pelo apoio e contribuições durante a realização deste trabalho.

RESUMO

Problemas de abastecimento de água são cada vez mais frequentes, devido principalmente ao crescimento populacional aliado ao aumento da demanda no consumo de água e à poluição de recursos hídricos, fatores que também podem ser indicados como os principais agravantes na escassez da água de qualidade. Dentro deste contexto nota-se claramente a necessidade de alguma medida para amenizar tal situação, como a busca por fontes alternativas de água. O aproveitamento da água de chuva se mostra como uma alternativa eficaz para o suprimento das demandas domésticas por água, além de diminuir a dependência das companhias de abastecimento. O presente trabalho apresenta um estudo sobre o tratamento da água de chuva, através da tecnologia de filtração com membranas, objetivando utilizar a água de chuva para fins potáveis, visto que o abastecimento público de água é deficitário em algumas regiões do país. A água de chuva geralmente possui boa qualidade, com baixos teores de materiais dissolvidos e/ou suspensos, necessitando de um tratamento mais simplificado que o convencional para torná-la potável. O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho de um piloto de microfiltração no tratamento da água de chuva, visando a potabilização, com base em alguns padrões estabelecidos pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde. A metodologia compreendeu coletas de água de chuva no período de Agosto de 2011 a Janeiro de 2012, com ensaios de microfiltração e análises físico-químicas (pH, alcalinidade total, dureza, cor e turbidez) e bacteriológicas (coliformes totais e termotolerantes) da água coletada do telhado e da água de chuva filtrada (permeado). A partir dos resultados foi possível verificar a eficiência do sistema na remoção das impurezas presentes, assim como encontrar as melhores condições de operação do piloto de microfiltração. A água da chuva se mostrou atraente como fonte alternativa de água e o sistema de microfiltração apresentou um bom desempenho no tratamento da água de chuva, removendo os principais parâmetros de interesse na potabilização.

Palavras-chave: água de chuva, potabilização, microfiltração.

ABSTRACT

Problems of water supply are becoming more frequent, mainly due to population growth with increased demand on water consumption and pollution of water resources, factors that may also be indicated as the main aggravating the scarcity of quality water. Within this context there is clearly a need for some measure to alleviate this situation, as the search for alternative sources of water. The use of rainwater is shown as an effective alternative for the supply of domestic water demands and to reduce dependence on supply companies. This paper presents a study on the treatment of rain water for drinking, since it is public water supply is deficient in some regions of the country. The rainwater usually has good quality with low levels of dissolved and /or suspended materials, requiring a more simplified than the conventional one to make it drinkable. The aim of this paper is to analyze the performance of a pilot microfiltration for the treatment of rain water in order to purifiers, based on standards established by the Resolution 2914/2011 from Ministry of Health. The methods included rainwater harvesting from 2011 August to 2012 January, with microfiltration essays and physical-chemical (pH, total alkalinity, hardness, color and turbidity) and bacteriological analysis (total coliform and thermotolerant) of rainwater collected from the roof and filtered rainwater (permeate). It was possible to verify the efficiency of the removal of parameters. Rainwater has proved attractive as an alternative source of water, and microfiltration pilot had a good performance in the treatment of rain water, removing the main parameters of interest in the purifiers.

Keywords: rainwater, treatment, microfiltration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática do ciclo hidrológico.	28
Figura 2: Série histórica de chuvas em Florianópolis.....	31
Figura 3: Esquema do processo de separação por membranas.....	43
Figura 4: Classificação dos processos de separação por membranas, em função da porosidade.....	45
Figura 5: Representação dos fluxos aplicados em membranas: a) convencional; b) tangencial.....	46
Figura 6: Localização da unidade experimental na UFSC.	47
Figura 7: Esquema da unidade experimental: captação, descarte e tratamento da água da chuva.	48
Figura 8: Fotografia do sistema de captação de água de chuva: a) remoção de folhas, b) dispositivo de descarte da primeira fração da água, c) armazenamento.	48
Figura 9: Fotografias do dispositivo de descarte da primeira fração da água de chuva.	49
Figura 10: Fotografia da unidade piloto de microfiltração tangencial. .	50
Figura 11: Esquema da unidade piloto com destaque dos componentes..	51
Figura 12: Relação entre a frequência de rotação da bomba de alimentação e a velocidade tangencial da água de torneira.	59
Figura 13: Relação entre a frequência de rotação da bomba de alimentação e o fluxo do permeado.....	60
Figura 14: Influência da pressão e frequência (30 Hz) no fluxo do permeado de água de chuva.	67
Figura 15: Influência da pressão e frequência (40 Hz) no fluxo do permeado de água de chuva.	68
Figura 16: Comparação entre os fluxos do permeado de água de chuva, com e sem a utilização do mecanismo de <i>backflushing</i> (P=1,0 Bar e f=30 Hz).	70
Figura 17: Comparação entre os fluxos do permeado de água de chuva, com e sem a utilização do mecanismo de <i>backflushing</i> (P=1,5 bar e f=30 Hz).	71
Figura 18: Comparação entre os fluxos do permeado de água de chuva, com e sem a utilização do mecanismo de <i>backflushing</i> (P=1,0 Bar e f=40 Hz).	72

Figura 19: Comparação da porcentagem de <i>fouling</i> nos ensaios de microfiltração com água de chuva, com e sem o acionamento do mecanismo de <i>backflushing</i>	73
Figura 20: Variação do pH da água da chuva ao longo dos ensaios de microfiltração.	74
Figura 21: Variação da alcalinidade da água da chuva ao longo dos ensaios de microfiltração.	76
Figura 22: Variação da dureza da água da chuva ao longo dos ensaios de microfiltração.	77
Figura 23: Variação da cor da água da chuva ao longo dos ensaios de microfiltração.	78
Figura 24: Eficiência do processo de microfiltração na remoção de cor na água da chuva.	79
Figura 25: Variação da turbidez na água da chuva ao longo dos ensaios de microfiltração.	81
Figura 26: Eficiência do processo de microfiltração na remoção da turbidez na água da chuva.	82
Figura 27: Média de precipitações mensais baseadas em uma série histórica de 10 anos para o município de Florianópolis.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características das membranas comerciais.....	44
Tabela 2: Parâmetros analisados e as respectivas técnicas analíticas....	57
Tabela 3: Média de fluxos de permeado nos ensaios de microfiltração tangencial com água de torneira.	62
Tabela 4: Resumo das características físico químicas e bacteriológicas da água de chuva, antes e após os ensaios de microfiltração.	65
Tabela 5: Resultados das análises bacteriológicas (coliformes totais e termotolerantes) da água da chuva coletada diretamente da atmosfera, após passar pela área de captação e após a microfiltração.	83
Tabela 6: Volumes mensais de chuva precipitados e disponíveis para captação, por metro quadrado de superfície, em Florianópolis.	85
Tabela 7: Relação entre o volume mensal de chuva precipitado em Florianópolis e o volume de água escoado em uma superfície de 100 m².	85

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

A -- Área superficial

C -- Coeficiente de escoamento superficial

Ca^{+2} -- Íon Cálcio

CaCO_3 -- Carbonato de Cálcio

CETESB -- Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento
Básico e Controle de Poluição das Água

CIP -- *Clean in Place* (Limpeza no local)

DQO -- Demanda Química de Oxigênio

EPAGRI -- Empresa de Pesquisa e Extensão Rural de Santa Catarina

ETE -- Estação de Tratamento de Esgoto

F -- *Fouling*

f -- Frequência

HNO_3 -- Ácido Nítrico

Hz -- Hertz

I -- Intensidade de precipitação

J -- Fluxo

LaRA -- Laboratório de Reuso de Água

LIMA -- Laboratório Integrado de Meio Ambiente

MF -- Microfiltração

Mg^{+2} -- Íon Magnésio

MS -- Ministério da Saúde

NaOH -- Hidróxido de Sódio

NBR -- Norma Brasileira

NMP -- Número mais provável

NF	--	Nanofiltração
OI	--	Osmose Inversa
P	--	Pressão
pH	--	Potencial Hidrogeniônico
Pr	--	Precipitação
PtCo	--	Platina-Cobalto
PVC	--	Policloreto de Vinila
Q	--	Vazão
t	--	Tempo
Tr	--	Período de Recorrência
UF	--	Ultrafiltração
UFC	--	Unidades Formadoras de Colônia
UFSC	--	Universidade Federal de Santa Catarina
UNT	--	Unidade Nefelométrica de Turbidez
UV	--	Ultra Violeta
V	--	Volume
Vt	--	Velocidade Tangencial
μm	--	Micrômetro

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	21
2.	OBJETIVOS	25
2.1	OBJETIVO GERAL.....	25
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1	CICLO HIDROLÓGICO	27
3.1.1	Ciclo urbano da água.....	28
3.2	PRECIPITAÇÃO	29
3.2.1	Pluviosidade em Florianópolis	30
3.2.2	Aproveitamento de água de chuva	31
3.2.3	Qualidade da água de chuva	36
3.2.4	Tratamento de água de chuva	38
3.3	MEMBRANAS	41
3.3.1	Histórico	41
3.3.2	Definição e Características	42
4.	METODOLOGIA	47
4.1	DESCRIÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO	47
4.2	UNIDADE PILOTO DE MICROFILTRAÇÃO	49
4.3	ENSAIOS DE MICROFILTRAÇÃO.....	51
4.3.1	Ensaio de microfiltração com água de torneira.....	51
4.3.2	Ensaio de microfiltração tangencial com água de chuva	53
4.4	LIMPEZA DA MEMBRANA.....	54
4.5	CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DA CHUVA	55
4.5.1	Coleta de amostras.....	55
4.5.2	Análises físico-químicas e bacteriológicas.....	56
4.6	ESTIMATIVA DE VOLUME DE CHUVA PARA CAPTAÇÃO	57

5.	RESULTADOS	59
5.1	ENSAIOS HIDRODINÂMICOS COM ÁGUA DE TORNEIRA	59
5.1.1	Relação entre a frequência e a velocidade tangencial	59
5.1.2	Relação entre a frequência e o fluxo do permeado	60
5.1.3	Relação entre frequência, pressão e fluxo do permeado ..	61
5.2	ENSAIOS DE MICROFILTRAÇÃO TANGENCIAL COM ÁGUA DE CHUVA	64
5.2.1	Análise do fluxo do permeado	66
5.2.2	Influência da descolmatação (<i>Backflushing</i>) no fluxo do permeado	69
5.2.3	Porcentagem de <i>fouling</i>	72
5.3	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E BACTERIOLÓGICAS	
	74	
5.3.1	pH.....	74
5.3.2	Alcalinidade	75
5.3.3	Dureza	76
5.3.4	Cor.....	78
5.3.5	Turbidez	80
5.3.6	Coliformes totais e termotolerantes.....	82
5.4	ESTIMATIVA DE VOLUME DE CHUVA PARA CAPTAÇÃO.....	84
6.	CONCLUSÕES.....	87
7.	RECOMENDAÇÕES	89
8.	REFERÊNCIAS	91

1. INTRODUÇÃO

A água é fundamental para a conservação e manutenção da vida, porém desde sempre foi usada sem a preocupação que este recurso pudesse se tornar escasso, devido à grande disponibilidade hídrica e/ou falta de conscientização por parte da população. O fato é que a água não está se extinguindo, mas a água de qualidade para fins potáveis está se tornando cada vez mais escassa.

O Brasil possui aproximadamente 12% da água doce do planeta, se enquadrando como um dos países mais privilegiados do mundo em relação à disponibilidade hídrica. Algumas regiões brasileiras, como o semiárido nordestino, enfrentam problemas de escassez de água devido a características hídricas locais desfavoráveis, como elevada evapotranspiração durante todo o ano e baixa precipitação, porém outras regiões que possuem considerada disponibilidade hídrica, já sofrem com escassez de água para fins potáveis (TUCCI, et al, 2000).

May (2004) ressalta que o crescimento populacional aliado ao aumento da demanda no consumo de água e a poluição de recursos hídricos podem ser indicados como os principais fatores agravantes na escassez da água de qualidade.

Gonçalves (2006) declara que além da escassez física de água de qualidade existem dois outros tipos de escassez: a econômica, que se refere à impossibilidade de se arcar com os custos de aquisição da água e a política, que corresponde às políticas públicas inexistentes ou inadequadas, que privam algum segmento da população do acesso à água.

Outro problema que pode ser indicado do uso e preservação da água é o desperdício da mesma, observado nos vazamentos das redes de distribuição de água e na agricultura, pela irrigação. O índice de perda, na rede de distribuição de água tratada, está entre 37% e 42% no Brasil (SNIS, 2011), enquanto nos países desenvolvidos este índice está entre 5% e 15% (REBOUÇAS, 2003).

Tomaz (2009) destaca que a conscientização acerca da importância de economia de água é um dos primeiros passos para atenuar os problemas de sua escassez.

May (2004) afirma que com a crescente disseminação de informações a respeito do risco de escassez de água potável, a conscientização sobre o uso da água tem aumentado, mas reforça que é necessária uma mudança de comportamento em relação ao uso da água.

Peters (2006) alerta para a necessidade do uso eficiente da água, exemplificando a redução na forma de consumo, através do uso de equipamentos reguladores de vazão em torneiras, chuveiros, mictórios e bacias sanitárias .

Dentro deste contexto, nota-se claramente a necessidade de alguma providência para amenizar tal situação, como a busca por fontes alternativas de água. O aproveitamento de água de chuva se mostra como uma alternativa eficaz para o suprimento das demandas domésticas por água, além de diminuir a dependência das companhias de abastecimento.

O aproveitamento da água de chuva é uma prática muito antiga utilizada por diversos povos de culturas e localizações distintas. Philippi et. al (2006) apontam que desde o Oriente Médio, Europa e América Latina, com os Maias, Incas e Astecas, há relatos de sistemas e dispositivos de coleta de água chuva construídos e operados há mais de 2.000 anos.

No aproveitamento de água de chuva deve ser levado em consideração a sua qualidade, que depende da composição atmosférica local (qualidade do ar), das condições da área de captação e do reservatório de armazenamento. No entanto, em locais que não possuem atividades industriais e/ou tráfego exacerbado de veículos, a água da chuva geralmente apresenta boa qualidade.

Muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas no sentido de aproveitar a água de chuva para os mais diversos usos, porém a maioria dos trabalhos visa à utilização desta água para fins não potáveis, principalmente para descarga em vasos sanitários e lavagem de roupas e calçadas. O motivo disto é que a água de chuva ao escoar pela área de captação pode sofrer contaminação por deposição de partículas e até por fezes de animais como pássaros e gatos. Logo, para utilizar esta água para fins potáveis, como consumo humano e preparo de alimentos, é necessário realizar um tratamento visando sua potabilização.

Existem diversas formas de se realizar o tratamento da água para torná-la potável, variando de técnicas simples às mais sofisticadas. O que vai definir o método a ser utilizado no tratamento é a qualidade da água a ser tratada. O tratamento convencional de água para consumo humano, normalmente utilizado para tratamento de águas superficiais nas cidades brasileiras, consiste de uma sequência de etapas: coagulação – floculação, sedimentação, filtração e cloração. As primeiras etapas objetivam retirar partículas sólidas e/ou coloidais em suspensão e a última etapa (cloração) visa efetuar a desinfecção da água, eliminando

assim possíveis microrganismos patogênicos presentes. Os padrões de potabilidade da água são impostos pelo Ministério da Saúde, através da Portaria 2914 de 12 de Dezembro de 2011. Dentre os tratamentos avançados podem-se destacar: Filtração através de membranas, Processos Oxidativos Avançados (POAs), Ozonização e Radiação Ultravioleta.

Varbanets et al. (2009) alegam que os sistemas centralizados de distribuição de água potável são muitas vezes deficientes e suscetíveis, alertando para a importância do crescimento de sistemas descentralizados. Os autores comentam que tais sistemas possam incluir baixo custo e necessidade de manutenção e facilidade de operação para que se tornem atraentes. A tecnologia de membranas é citada como interessante devido ao seu desempenho na remoção de patógenos e turbidez e ao decaimento do custo nas últimas décadas. Porém, ressaltam que existe a necessidade de estudos e investigação para tornar os sistemas mais acessíveis.

A tecnologia de membranas vem sendo estudada há bastante tempo, aproximadamente desde a metade do século XVIII, porém somente a partir do século XX a Alemanha inicia o desenvolvimento do procedimento de fabricação de membranas. Atualmente, as membranas filtrantes constituem uma das principais inovações tecnológicas de tratamento de água e esgoto. O aumento da escala de produção aliado ao contínuo aprimoramento viabilizaram a construção de sistemas de membranas em grande escala, chegando a substituir sistemas convencionais de tratamento de água em alguns países.

O processo de filtração por membranas consiste, de maneira geral, na separação de uma fase sólida e uma fase líquida. De acordo com Metcalf e Eddy (2003) os principais processos de filtração por membranas são: microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa; os quais se distinguem pela força motriz atuante, tamanho dos poros, material da membrana e mecanismo de separação.

Dentre os processos citados a microfiltração possui os maiores poros e consequentemente necessita de menor pressão na filtração. As membranas de microfiltração podem ser produzidas em material cerâmico, polímeros ou metal.

O presente trabalho avaliou o tratamento de água de chuva através de membrana de microfiltração, visando o seu uso para fins potáveis. Este estudo se insere dentro da linha de pesquisa de tratamento de águas e efluentes domésticos, industriais e agropecuários contemplada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

(PPGEA). Visa dar continuidade aos estudos relacionados ao aproveitamento de água de chuva já realizados pelo PPGEA - Jaques (2005); Peters, (2006); Martins (2008), Lisboa (2011) - assim como pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Pizzolatti (2007), Lisboa (2008), Silveira (2008) e aos estudos relacionados à utilização de membranas no tratamento de água realizados pelo Laboratório de Reuso de Água (LaRA) – Pelegrin (2004), Campelo (2009), Coral (2009), Belli (2011).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de um sistema de microfiltração tangencial no tratamento de água de chuva para fins potáveis.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o desempenho, em termos de fluxo de permeado, do sistema de microfiltração tangencial;
- Avaliar a qualidade da água de chuva (parâmetros físico-químicos e bacteriológicos) antes e depois de submetida à microfiltração;
- Avaliar o volume de água de chuva disponível para captação no município de Florianópolis.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CICLO HIDROLÓGICO

Silveira (2009) define o ciclo hidrológico como o processo de circulação, em ciclo fechado, da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, devido principalmente à radiação solar associada à gravidade e rotação da Terra. A superfície terrestre, neste caso, engloba os continentes e oceanos, participando do ciclo a camada porosa do continente (rochas e solos). A atmosfera possui uma grande extensão com diversidade de condições físicas, no entanto a maior parte dos fenômenos meteorológicos ocorre na camada mais próxima do continente, a troposfera de 8 a 16 km de espessura.

A transferência de água entre a superfície e a atmosfera, ocorre em dois sentidos: superfície – atmosfera, onde a água flui essencialmente sob a forma de vapor, em decorrência da evaporação e transpiração; e no sentido atmosfera – superfície, onde a água é transferida em diversos estados físicos, sendo os mais comuns no estado líquido, em forma de chuva, e sólido em forma de neve ou granizo (SILVEIRA, 2009).

O ciclo hidrológico pode ser descrito a partir do vapor d'água, presente na atmosfera, que se condensa, devido às condições meteorológicas favoráveis, formando gotículas de água que permanecem suspensas no ar. O agrupamento dessas gotículas, com o vapor d'água e partículas de poeira formam as nuvens. Os movimentos dinâmicos das massas de ar são responsáveis pela principal transferência de água da atmosfera para a superfície, a precipitação. A precipitação ocorre quando no interior da nuvem há um aumento da umidade (vapor d'água) a tal ponto que forma grande quantidade de gotas, com peso e tamanho suficientes para que a força da gravidade seja maior que a turbulência dos movimentos ascendentes da atmosfera. Em seu trajeto em direção à superfície, parte da precipitação já é evaporada se mantendo na forma de vapor na atmosfera. Quando a precipitação incide sobre a superfície terrestre, em um local com cobertura vegetal, parte da água é interceptada por folhas e caules e evapora, parte atinge o solo. A água da chuva que incide sobre o solo pode infiltrar e escoar pela superfície. Como o solo é um meio poroso a tendência é que ocorra a infiltração, que no início será alta e com o passar do tempo diminuirá indicando a saturação do solo. Da água infiltrada no solo parte é aproveitada pelas

plantas, que a devolvem à atmosfera através da transpiração, e parte é percolada até o lençol freático que contribuem na vazão dos rios. Com o solo saturado inicia-se o processo do escoamento superficial, que impulsionado pela gravidade tende a levar a água aos pontos mais baixos da superfície, chegando até os córregos e rios que por sua vez desaguam no oceano, de onde a água retorna, através da evaporação, à atmosfera reiniciando o ciclo. Em todos os momentos de movimento de água na superfície terrestre, seja no continente ou nos oceanos há evaporação para a atmosfera, mas como 70% da superfície da Terra é coberta pelos oceanos, é ali que reside a maior contribuição na evaporação (Silveira, 2009). A Figura 1 ilustra o ciclo hidrológico.



Figura 1: Representação esquemática do ciclo hidrológico.

Fonte: infoescola.com. (2011).

3.1.1 Ciclo urbano da água

O ciclo hidrológico considera o movimento da água na natureza de forma natural, sem a interferência do ser humano neste ciclo. A água é um recurso essencial à vida e como a população apresenta um crescimento cada vez mais acelerado, a necessidade por este recurso tende a aumentar. O ser humano interfere no ciclo hidrológico através,

principalmente, da retirada de água da natureza para os diversos usos e do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica.

Sperling (2005) cita os principais usos da água dentro da sociedade, sendo eles: abastecimento doméstico e industrial, irrigação, dessedentação de animais, recreação e lazer, geração de energia elétrica, aquíicultura, navegação e diluição de despejos. O autor destaca a atenção aos usos que consomem grandes volumes de água (abastecimentos doméstico e industrial e irrigação) e que implicam na retirada de água dos recursos hídricos, pois os demais usos são desempenhados no próprio corpo d'água. Além da retirada de grandes volumes para o abastecimento doméstico e industrial há a alteração da qualidade da água, pois após a distribuição parte desta água retorna ao meio ambiente em forma de esgoto, utilizando os corpos hídricos para a diluição dos efluentes gerados, impactando negativamente o bioma aquático.

A impermeabilização de superfícies, para construções e rodovias, aliado ao desmatamento faz com que diminua a infiltração das chuvas e aumente o consideravelmente escoamento superficial, o que consequentemente acarreta o risco de enchentes e o aumento potencial de erosões nos solos.

3.2 PRECIPITAÇÃO

Precipitação atmosférica é a descarga de água resultante da evaporação de rios, lagos e mares, sobre a superfície da Terra, sob a forma de chuva, orvalho, granizo ou neve. A chuva pode ser considerada a precipitação mais significativa em termos de frequência (Villiers, 2002).

May (2004) ressalta que a chuva além de transferir água da superfície para a atmosfera e vice-versa, ela é importante no equilíbrio radioativo da Terra e não depende apenas da evaporação, mas também da topografia e dos ventos.

Segundo Bertoni e Tucci (2009) as chuvas podem ser classificadas em três tipos principais:

- Convectivas: Formadas pela ascensão de massas de ar quente carregadas de vapor d'água, partindo da superfície. À medida que a massa de ar vai ascendendo, a mesma sofre resfriamento acarretando na condensação do vapor d'água, provocando a precipitação. Típicas de regiões equatoriais, geralmente são de grande intensidade e curta duração;

- Orográficas: Ocorrem quando massas de ar quente e úmidas, provenientes dos oceanos em direção ao continente, encontram uma barreira física (montanhas), elevam-se e resfriam rapidamente, resultando na condensação de vapor, formação de nuvem e precipitação. Geralmente são chuvas de pequena intensidade e de grande duração;
- Frontais ou Ciclônicas: Formadas pelo encontro de massas de ar quente e frias, onde a massa de ar quente e úmida é impulsionada para cima. Com essa ascensão a massa de ar quente é resfriada, condensando o vapor d'água e gerando a precipitação. São chuvas de grande duração que pode atingir grandes áreas e possui intensidade média geralmente. Podem vir acompanhadas por ventos fortes com circulação ciclônica.

Bertoni e Tucci (2009) apontam para a importância do conhecimento das grandezas que caracterizam uma chuva, sendo elas:

- Altura pluviométrica (P): é a espessura média da lâmina de água que cobriria a região, admitindo que não houvesse infiltração, evaporação ou escoamento superficial. Geralmente expressa em milímetros de chuva, sendo que um milímetro de chuva corresponde a um litro de água distribuído superficialmente por metro quadrado de área;
- Duração (t): é o período de tempo que dura a precipitação. Geralmente expressa em minutos ou horas;
- Intensidade (I): é a o volume de chuva que cai por unidade de tempo, obtida pela relação $I = P/t$. Expressa normalmente em mm/h ou mm/min;
- Tempo de recorrência (Tr): Período de tempo, geralmente expresso em anos, em que espera-se que determinado evento de precipitação seja igualado ou superado.

3.2.1 Pluviosidade em Florianópolis

A capital do estado de Santa Catarina apresenta as estações do ano bem caracterizadas, com primavera e outono semelhantes e verão e inverno bem definidos. A precipitação é bem distribuída durante o ano, sendo que de Janeiro a Março ocorrem as maiores precipitações e de Abril a Agosto as menores. De acordo com dados provenientes da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), na série histórica de 2001 a 2011 o município de

Florianópolis apresentou uma média de precipitação anual de aproximadamente 1800 mm (Figura 2).

Azevedo Neto (1991) declarou que o aproveitamento de água de chuva para abastecimento público tem viabilidade razoável em locais com precipitação média anual entre 1000 e 1500 mm e excelente acima de 2000 mm. A partir desta perspectiva nota-se que Florianópolis apresenta viabilidade potencial para abastecimento público através da água de chuva.

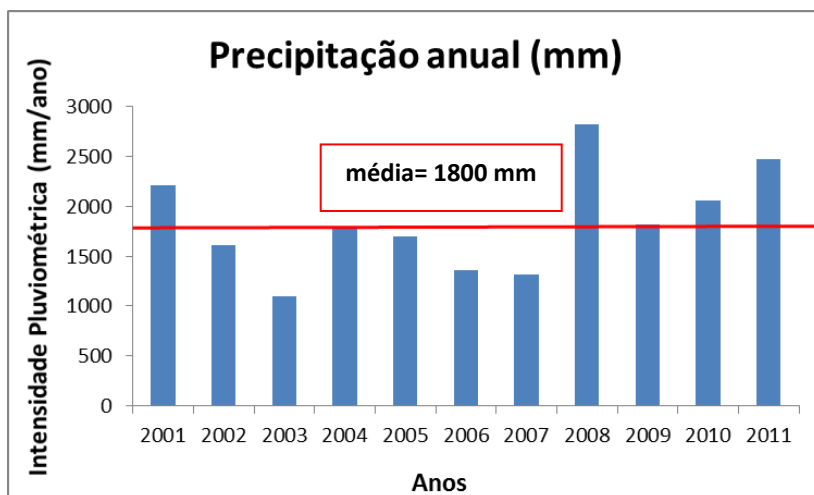


Figura 2: Série histórica de chuvas em Florianópolis. Fonte:EPAGRI (2012).

3.2.2 Aproveitamento de água de chuva

O aproveitamento de água de chuva para suprir as demandas de usos é uma prática bastante antiga e que já era praticada há muito tempo por povos em várias partes do mundo, desde lugares áridos, onde não chove muito, até localidades com grande pluviosidade.

Relatos apontam escavações, em forma de reservatórios, em rochas na ilha de Creta em 3.000 a.C. para armazenamento de água da chuva. Na mesma ilha, no palácio Knossos, há aproximadamente 2000 a.C., a água da chuva era armazenada e utilizada em bacias sanitárias. A Pedra Moabita, uma das inscrições rupestres mais antigas do mundo, datada de 850 a.C., foi encontrada no Oriente Médio, com recomendação que em cada casa se construísse um reservatório para

armazenamento da água da chuva. Em Israel, na fortaleza da Masada encontraram-se dez reservatórios escavados em rocha, com capacidade total de 40.000 metros cúbicos. No México, na península de Iucatã, existem reservatórios com datação anterior ao descobrimento das Américas e que ainda estão em uso (TOMAZ, 2003).

Antigamente na cidade de Sumida, no Japão, havia tinas para armazenar água da chuva em muitos locais da comunidade. Os formuladores de tal idéia propuseram armazenar água da chuva em reservatórios comunitários para ser usado pela comunidade na irrigação de plantas, combate de incêndios e tempos de escassez de água, além de reduzir o volume de água escoada pelas ruas e canais. No Bairro Ichitera-Kotoi foi aplicada a idéia de “Oásis de Sumida”, onde é possível encontrar tais tanques comunitários, chamados *Tensuison* (respeito à abençoada água da chuva), munidos de torneira e bomba manual para que a população possa utilizar essa água para o fim desejado. Quando o volume dos tanques era ultrapassado em eventos de chuvas intensas, a água excedente era infiltrada no solo (GROUP RAINDROPS, 2002).

Em alguns locais do mundo, como Califórnia, Alemanha e Japão, são oferecidos financiamentos como forma de incentivo para a construção de sistemas de captação de água de chuva. Hamburgo foi o estado alemão pioneiro no aproveitamento de água de chuva, com início do processo em 1988 e estima-se que até o ano 2000 havia aproximadamente 1500 sistemas particulares de captação de água de chuva, os quais além do benefício local da economia com água reduzem o risco de enchentes nas cidades (TOMAZ, 2003).

Na Alemanha, assim como em muitos lugares, o aproveitamento da água pluvial é destinado para fins não potáveis como descarga de vasos sanitários, irrigação de jardins, máquinas de lavar e uso industrial. Porém, acredita-se que no futuro as companhias públicas e privadas de abastecimento de água potável, utilizarão a água da chuva como fonte alternativa, devido à sua qualidade, disponibilidade e pesquisas que vem sendo desenvolvidas ao longo dos anos (TOMAZ, 2003).

Na Holanda a água da chuva é coletada com a finalidade principal de evitar o transbordamento dos canais que rodeiam o país, evitando enchentes, visto que o mesmo está situado abaixo do nível do mar. A água armazenada é utilizada na irrigação de lavouras e abastecimento de fontes ornamentais (PNUMA, 2001e MAY, 2004).

Segundo Ghanayem (2001), a instalação de aproveitamento de água de chuva mais antigo do Brasil foi construída em 1943, por norte-

americanos, na ilha de Fernando de Noronha. Atualmente ainda se utiliza água de chuva para abastecimento da população da ilha.

Tomaz (2009) listou e delineou sobre os principais elementos que compõe um sistema de coleta e armazenamento de água de chuva:

- Área de captação: área superficial projetada na horizontal em m², onde será realizada a coleta da água de chuva. Geralmente são telhados, constituídos dos mais diversos materiais, como cerâmica, fibrocimento, zinco, plástico ou concreto armado;
- Calhas e condutores: As calhas são instaladas junto ao telhado, com a finalidade de coletar a água que escoar pelo mesmo. Acoplados às calhas estão os coletores, tubos que levam a água coletada até o reservatório. Podem ser de PVC ou metálicos;
- Dispositivo de descarte: dispositivo que desvia a primeira fração de água de chuva que escoar pelo telhado, pelo fato desta água carrear sujeira depositada no telhado. Pode ser manual ou automático;
- Reservatório: utilizado para o armazenamento da água de chuva, pode ser apoiado no chão, enterrado ou elevado, construído em concreto armado, alvenaria de tijolos, plásticos, chapas de zinco ou ferro-cimento.

Segundo May (2004) a quantidade de água de chuva que pode ser armazenada depende da precipitação atmosférica, da área de coleta disponível e do coeficiente de escoamento da área de coleta. Recomenda ainda, para que não ocorram entupimentos nos condutores que levam água até o dispositivo de descarte, colocar uma tela ou peneira na saída da calha para a remoção de folhas e galhos. Como a água é coletada geralmente em telhados e estes contém poeira, fuligem e fezes de pequenos animais como pássaros, gatos e roedores, recomenda-se que a primeira fração de chuva, a água que lava a superfície de captação, seja descartada. Existem diversos mecanismos utilizados para realizar este descarte, variando dos mais simples e manuais aos mais sofisticados e automáticos.

O principal e mais oneroso elemento de um sistema de captação de água de chuva é o reservatório (cisterna), que pode ser fabricado nos mais variados tipos de materiais. Existem diversos métodos para se calcular o volume do reservatório, sendo que cada método leva em consideração em conjunto todos ou a combinação de alguns dos fatores: precipitação, área de captação, coeficiente de escoamento e demanda necessária.

Segundo Thomas (2001) a escolha do tipo de reservatório se dá principalmente pela durabilidade, segurança e baixo custo. A técnica de ferro-cimento tem se mostrado popular e atraente em termos de custo e consiste em uma estrutura cilíndrica feita em uma malha de ferro com espaçamento de dez centímetros, atada com tela de galinheiro, apoiada sobre um alicerce de concreto. Por cima da malha com tela colocam-se quatro camadas sucessivas de massa de cimento, sendo duas internas e duas externas. A parede final é resistente e apresenta uma espessura média de 1 a 2 cm.

Segundo Schistek (2001), o semiárido brasileiro apresenta condições de chuvas irregulares e elevadas taxas de evapotranspiração, com 80% da área geográfica do subsolo com formação cristalina, sem lençol freático, o que indica a coleta da água da chuva como uma opção muito atraente para disponibilizar água para consumo humano.

As tecnologias alternativas de captação e armazenamento de água de chuva vêm sendo utilizadas em diversos estados do Nordeste e em Minas Gerais, no entanto não há uma sistematização no uso das técnicas nem um monitoramento dessas experiências (PALMIER, 2001). Segundo Sonda et al. (2001), a construção de cisternas no semiárido brasileiro trouxe diversos benefícios às pessoas que foram contempladas com esta tecnologia, dentre os quais se pode citar redução de doenças de veiculação hídrica, facilidade de acesso à água e disponibilidade de água para beber e cozinhar.

Em Julho de 2003 iniciou no Brasil o Programa de Formação e Mobilização Social para a Convivência com o Semi-Árido: Um Milhão de Cisternas Rurais – PIMC, que vem desencadeando um movimento de articulação e convivência sustentável com o ecossistema do semiárido, através do fortalecimento da sociedade civil, da mobilização, envolvimento e capacitação das famílias. O programa visa construir 1 milhão de cisternas e beneficiar cerca de 5 milhões de pessoas em toda a região semiárida. As cisternas são de 16 mil litros de capacidade e construídas em placas de concretos por pedreiros das localidades, capacitados pelo PIMC, e pelas próprias famílias que entram com alguns serviços, como escavação, em contrapartida pelo benefício. A água captada e armazenada nas cisternas é para os usos gerais de uma residência, inclusive para beber e cozinhar (ASA BRASIL, 2011).

May (2004) ressalta que apesar dos benefícios visíveis e concretos da economia de água e da melhoria da qualidade de vida das pessoas que utilizam a chuva como fonte de água, a importância da coleta de água de chuva é pouco compreendida pela maioria dos

técnicos, governantes e pela própria população. Dentro deste contexto há necessidade da realização de mais pesquisas no intuito de avaliar o potencial hídrico nas regiões do Brasil, além de estudos visando à otimização do processo de coleta, armazenamento e tratamento da água de chuva.

O baixo custo da água fornecida pelas companhias de saneamento nas residências, onde o consumo é relativamente baixo, desestimula o investimento em um sistema de aproveitamento de água de chuva. Mas no caso das indústrias, onde o volume de água utilizado é muito grande, torna-se sensato a utilização de fontes alternativas de água, como a água de chuva (JAQUES, 2005).

Apesar de no Brasil a coleta de água de chuva vir sendo realizada em várias regiões há alguns anos, somente em 2007 surgiu a NBR 15527 – “Água de Chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas”. Tal norma objetiva fornecer conceitos e diretrizes básicas ao aproveitamento de águas pluviais para fins não potáveis em edificações (MAY, 2009).

A NBR 15527/2007 define para efeito de aplicação alguns termos e definições que constituem um sistema de captação de água de chuva, dos quais os considerados mais importantes seguem listados:

- Água de chuva: Água resultante de precipitações atmosféricas coletadas em coberturas, onde não haja circulação de pessoas ou veículos;
- Coeficiente de escoamento superficial (C): Também conhecido como coeficiente de *runoff*, representa a relação entre o volume total de escoamento superficial e o volume total precipitado, variando de acordo com o tipo de superfície;
- Demanda: Consumo médio (diário ou mensal) de água a ser atendido;
- Escoamento inicial: Água proveniente da área de captação suficiente para carregar poeira, fuligem, folhas e detritos. Corresponde à água de lavagem do telhado ou *first flush*.

A norma supracitada aborda também sobre a concepção do sistema de aproveitamento de água de chuva, destacando a importância da contemplação de normas complementares, além de delinear sobre calhas e condutores, dispositivo de descarte do escoamento inicial da chuva e dimensionamento de reservatórios.

Algumas cidades brasileiras já possuíam suas legislações referentes à coleta de águas pluviais, antes mesmo da criação da NBR 15527/07, de forma a reduzir problemas de inundação, devido ao alto

índice de impermeabilização de áreas e proporcionar a conservação no uso da água potável. Na cidade de São Paulo, a Lei nº 13276/2002 obriga a construção de piscinas de contenção nas edificações que possuírem uma área impermeabilizada maior que 500 m². Em Curitiba, a Lei nº 10785/2003 regulamenta o Programa de Conservação e Uso Racional das Águas em Edificações, que objetiva instituir medidas que favoreçam o uso racional da água e a conscientização dos usuários acerca da importância da conservação da água potável. Dentro deste contexto a lei incentiva à captação de água de chuva na cobertura das edificações para fins que não necessitem de água tratada (MAY, 2009).

3.2.3 Qualidade da água de chuva

A qualidade da água da chuva é um fator que deve ser levado em consideração, ainda mais com o crescente interesse no aproveitamento deste recurso para os mais diversos fins, principalmente nos centros urbanos. Existem muitos fatores que influenciam na qualidade da água de chuva, podendo ser naturais ou artificiais (ANNECCHINI, 2005).

Dentre os fatores naturais que influenciam na qualidade da água da chuva pode-se citar a composição natural da atmosfera, o regime de ventos, a vegetação e a influência marítima na composição atmosférica. Segundo Anecchini (2005), em regiões litorâneas existe a probabilidade de encontrar sódio, potássio, magnésio e cloro na água de chuva, e em regiões rurais, onde predominam áreas não pavimentadas poderão estar presentes na água partículas de origem terrestre como sílica, ferro e alumínio, pois a água da chuva absorve as impurezas presentes na atmosfera e assim suas características estão relacionadas com as atividades predominantes na região.

Segundo Tomaz (1998), próximo ao oceano a água da chuva contém os elementos cloro, potássio, magnésio, cálcio e sódio em concentrações proporcionais às encontradas na água do mar. Martins (2008) observou a concentração de cloreto, sódio e magnésio em amostras de água de chuva na cidade de Florianópolis, associando o fato à presença de aerossóis marinhos sobre a cidade nos determinados eventos chuvosos. A autora ressalta que de acordo com a literatura consultada, a concentração de sódio indicou que 77% das amostras coletadas indicaram chuvas de origem continental e 23% apresentaram concentrações elevadas, indicando forte influência marítima na composição iônica das águas de chuva.

Segundo May (2004) os poluentes atmosféricos podem ser classificados em duas categorias:

- Poluentes Primários: aqueles lançados diretamente na atmosfera pela fonte poluidora. Os principais poluentes desta categoria são material particulado, compostos de nitrogênio e enxofre, compostos halogenados e orgânicos.
- Poluentes Secundários: Resultantes de reações químicas entre poluentes primários e componentes naturais da atmosfera. Como exemplos têm-se os oxidantes e névoas ácidas.

A poluição (partículas e gases da atmosfera) quando cai tendo como veículo a água da chuva, vapor d'água ou aerossóis, é denominada deposição úmida. Segundo Fornaro (1991) apud May (2004), a deposição úmida pode se dar através de dois processos:

- *Rainout*: Onde ocorre a remoção de partículas e gases por gotas de água nas nuvens.
- *Washout*: As partículas e gases são removidos por arraste através das gotas de chuva.

Anneccchini (2005) em seu estudo na cidade de Vitória-ES, concluiu que os primeiros milímetros de chuva são mais poluídos e que ao longo da chuva ocorre uma melhoria na qualidade da água, demonstrando assim que a chuva desempenha um papel fundamental na remoção de poluentes da atmosfera. A chuva ao remover os poluentes da atmosfera pode sofrer acidificação, ocorrendo o fenômeno de chuva ácida que acarreta diversos danos aos rios, lagos e florestas, além de estruturas e materiais.

Andrade Neto (2003) alerta que os metais pesados, podem estar presentes na atmosfera de locais com elevado tráfego de veículos ou em áreas industriais, o que faz com que a água da chuva destes locais se contamine por metais. Ainda, substâncias químicas orgânicas, como organoclorados e organofosforados, usadas como defensivos agrícolas também têm potencial de contaminar a água da chuva, quando presentes na atmosfera.

De acordo com a CETESB (2003), historicamente a poluição atmosférica era proveniente principalmente das emissões industriais e de veículos automotores, entretanto nos últimos anos a queima de combustíveis pela frota veicular tem sido indicada como a principal fonte de poluentes atmosférica. Manahan (2005) alerta que no material particulado emitido para o ar, estão presentes metais traços como

chumbo, cádmio e cobre, que merecem atenção, pois apresentam elevada toxicidade e são potencialmente prejudiciais à saúde. A chuva carrega consigo o material particulado, consequentemente os metais pesados, e dependendo das condições de solubilidade os mesmos se tornam biodisponíveis para interagir com os seres vivos do local da precipitação, podendo ser no solo ou superfícies aquáticas. Fornaro, Fontenele e Pedrotti (2009) realizaram análise dos metais cádmio (Cd), chumbo (Pb) e cobre (Cu) na água da chuva da cidade de São Paulo encontrando concentrações de $0,15 \mu\text{g.L}^{-1}$; $1,73 \mu\text{g.L}^{-1}$ e $3,14 \mu\text{g.L}^{-1}$, respectivamente. Essas concentrações foram menores àquelas encontradas em outras regiões urbanas e industrializadas como Paris e Singapura. Porém, as concentrações de cobre encontradas em São Paulo foram maiores do que os valores encontrados na cidade de Florianópolis-SC ($0,40 \mu\text{g.L}^{-1}$), em Candiota-RS ($1,95 \mu\text{g.L}^{-1}$) e em Porto Alegre-RS ($2,76 \mu\text{g.L}^{-1}$).

A qualidade da água da chuva é comprometida e influenciada pela composição química da atmosfera, e quando se faz o aproveitamento da água de chuva através da captação em superfície, deve acrescer a estes fatores a possível contaminação proveniente desta área de captação. As superfícies de captação de água de chuva, geralmente telhados de edificações, são locais que propiciam a deposição de partículas de poluição, poeira, folhas e até fezes de pequenos animais como aves e gatos, o que altera a qualidade da água captada.

Nos trabalhos de May (2004) em São Paulo, Jacques (2005) em Florianópolis e Annecchini (2008) em Vitória, os autores observaram que a água da chuva apresentou um aumento de pH ao passar pelas coberturas de captação nas distintas cidades, relacionando este aumento à deposição de partículas e composição do material do telhado.

Jacques (2005) afirmou que os valores de cor e turbidez, para amostras de água de chuva coletadas em Florianópolis, foram diminuindo com o passar do tempo durante a chuva, melhorando a qualidade da água, o que reforça a importância de se descartar a primeira fração de água que escoar pelo telhado.

3.2.4 Tratamento de água de chuva

A água de chuva geralmente apresenta baixos teores de sólidos suspensos e/ou dissolvidos, necessitando de um tratamento mais simplificado que o convencional para torná-la potável, no entanto, uma

grande variedade de processos pode ser aplicada no seu tratamento. Jacques (2005) demonstrou que a água da chuva geralmente apresenta uma qualidade boa, porém não é potável, a qual é influenciada pela qualidade do ar local e pelo tipo do telhado onde é captada, por isso enfatizou a necessidade de descartar a primeira fração de água de chuva coletada a fim de melhorar a qualidade da mesma.

Vasudevan e Pathak (2005), recomendam um sistema de filtração simples para população de baixa renda, composto por pedregulho, areia e carvão. Porém Fendrich e Oliynik (2002) alertam que a água da chuva para ser utilizada para consumo, mesmo após passar por um processo de filtração, necessita de uma desinfecção, que pode ser feita por simples fervura ou cloração ou então por radiação ultravioleta em casos mais extremos.

Jones (2007) realizou uma pesquisa com o intuito de verificar o desempenho de um filtro biológico de areia no tratamento de água de chuva. Foram realizados ensaios de filtração com camadas 10, 20 e 30 cm de espessuras de areia no filtro, proporcionando uma redução de sólidos, porém a remoção de coliformes totais e fecais não foi significativa. Os resultados mostraram que a filtração não foi eficiente na produção de água potável nas condições estabelecidas, possivelmente pelo tempo de residência hidráulica no filtro e/ou espessura de areia insuficiente.

Fagundes e Caliar (2009) propuseram um sistema simples e de baixo custo para tratamento da água de chuva, composto por um filtro lento descendente (areia + brita) seguido de um sistema de desinfecção com hipoclorito de sódio. O processo de filtração lenta tem sido indicado devido à facilidade operacional, baixo custo de implantação e operação e eficiência na remoção de sólidos e patogênicos. Bons resultados foram conseguidos, atendendo os padrões de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde, porém a utilização do cloro como agente desinfetante pode gerar subprodutos na água. Alvarenga (2010) encontrou alguns subprodutos do cloro, em concentrações acima dos limites estabelecidos em legislação, em água tratada, alertando para o risco de desenvolvimento de câncer ao ingerir água contendo tais subprodutos.

Uma variação do sistema apresentado anteriormente para a potabilização da água de chuva é a associação de filtração lenta com posterior desinfecção por radiação ultravioleta (UV). Bastos (2007) avaliou este tipo de composição de sistema, alcançando eficientes remoções de turbidez e série de sólidos, e considerável remoção de

coliformes totais, somente na etapa de filtração lenta. Na etapa de desinfecção por radiação UV uma inativação total dos microrganismos foi observada.

Ribeiro et al. (2009) apresentaram a implantação de um sistema de coleta de água de chuva no Aeroporto Internacional de São Paulo, como forma de suprir a demanda de água exigida no local e escolheram o tratamento da água captada através de ozonização. O ozônio se destaca entre os outros métodos de desinfecção devido a alguns fatores: destruição de pigmentos, detergentes e fenóis, forte oxidação de matéria orgânica e atuação rápida e eficiente sobre bactérias, vírus e protozoários. Tal tecnologia vem sendo aplicada em diversas localidades dos Estados Unidos durante as últimas décadas, para o tratamento de água de abastecimento, com diversas finalidades, como remoção de cor, odor, sabor, ferro e manganês. Os autores relataram ainda que o maior empecilho na aplicação da tecnologia de ozônio é o seu custo elevado, contudo optaram pela mesma devido às vantagens já mencionadas e pelo fato de o grupo de pesquisa já estar estudando tal tecnologia.

Areerachakul et al. (2009) realizaram um experimento de tratamento de água de chuva, na Tailândia. O tratamento era composto por um filtro de carvão ativado granular seguido por microfiltração com uma membrana submersa. O carvão ativado foi usado como pré-tratamento para a microfiltração, para a remoção de matéria orgânica dissolvida através da formação de biofilme por adsorção. A membrana de microfiltração, com diâmetro médio de poros de 0,1 μm , foi utilizada para tratamento da água da chuva proveniente da biofiltração, com a finalidade de remover microrganismos/patógenos. O biofiltro de carvão ativado granular proporcionou uma remoção significativa de matéria orgânica e a membrana submersa de microfiltração, uma remoção total de microrganismos. A utilização do biofiltro como pré-tratamento aumentou a eficiência do sistema, reduzindo o *fouling* da membrana.

Valle, Pinheiro e Siqueira (2009) avaliaram um sistema de microfiltração, através de membrana cerâmica, para o tratamento da água de chuva. O módulo de membrana cerâmica utilizado era do tipo tubular, com área efetiva de filtração de 0,005 m^2 e diâmetro médio dos poros de 0,2 μm . Foram analisados os parâmetros pH, turbidez, cor aparente e coliformes totais, antes e depois da filtração da água. Boas remoções de turbidez e cor foram alcançadas, demonstrando a capacidade que este tipo de tratamento apresenta na clarificação de líquidos. Para coliformes totais, parâmetro de maior interesse, a técnica

utilizada foi limitada, pois a detecção mínima era de 10^3 UFC/ml e na Portaria MS 518/2004 é exigida ausência de coliformes totais.

Kim et al. (2007) realizaram testes de microfiltração com água de chuva. Foram utilizadas três membranas metálicas com tamanho médio de poros de 5, 1 e 0,5 μm , sendo que as mesmas não apresentaram um desempenho satisfatório na remoção de cor, turbidez e DQO, possivelmente devido ao tamanho dos poros da membrana utilizada.

Alguns trabalhos já foram desenvolvidos e outros estão em desenvolvimento visando o tratamento da água de chuva para que a mesma possa ser utilizada para fins potáveis, mas o que se tem investido nesse âmbito ainda não é significativo, destacando a necessidade de mais estudos e incentivos nessa área.

3.3 MEMBRANAS

3.3.1 Histórico

A tecnologia de membranas vem sendo estudada há bastante tempo, aproximadamente desde a metade do século XVIII, primeiramente apenas com observações e relatos acerca das propriedades físicas de barreira, sem entrar na questão de técnicas de produção e aplicações. Somente no início do século XX a Alemanha inicia o desenvolvimento do procedimento de fabricação de membranas e das técnicas de filtração para uso em laboratório. Logo depois da segunda guerra mundial o governo americano preocupado com a contaminação bacteriológica das fontes de água, encarregou um grupo para estudar a tecnologia de membranas, já desenvolvida pelos alemães. Entre 1947 e 1950 tais cientistas americanos já tinham desenvolvido o procedimento de fabricação de membranas (PRESSWOOD, 1981).

A comercialização de membranas se iniciou com a osmose reversa para a dessalinização da água do mar na década de 60, e a nanofiltração, uma variante desta tecnologia que opera com pressões menores, começou a ser utilizada na redução de dureza de águas subterrâneas na Flórida (EUA) e remoção de cor de águas provenientes de zonas com turfa, na Noruega, na década de 80. O grande avanço da tecnologia de membranas para uso no saneamento básico se deu no início da década de 90, com o lançamento das membranas de micro e ultrafiltração, para a produção de água potável em escala comercial (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Atualmente, as membranas filtrantes constituem uma das principais inovações tecnológicas de tratamento de água e esgoto. O aumento da escala de produção aliado ao contínuo aprimoramento viabilizaram a construção de sistemas de membranas em grande escala, chegando a substituir sistemas convencionais de tratamento de água em alguns países. Alguns fatores podem ser considerados primordiais na adoção da tecnologia de membranas frente aos sistemas convencionais de tratamento de água e efluentes:

- Redução do custo de construção e operação;
- Legislação, pois os limites de patógenos e contaminantes químicos na água ou em efluentes são progressivamente reduzidos e a tecnologia de membranas tem a capacidade de atender às restrições impostas;
- A necessidade de reuso da água utilizada.

3.3.2 Definição e Características

Existem muitas definições para o termo membrana, por isso fica difícil obter uma definição exata, mas em geral, sem levar em conta a estrutura nem a função da membrana, a mesma pode ser definida como: “uma barreira entre duas fases” (MULDER, 1997). De uma forma mais específica pode ser definida como um fino filme sólido que separa duas soluções e que atua como uma barreira seletiva para o transporte de componentes das soluções, sob uma força externa que pode ser diferença de pressão ou concentração (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). Ou ainda podem ser classificadas como filtros porosos de superfície, onde partículas que têm o diâmetro maior que o tamanho do diâmetro dos poros da membrana ficam retidas em sua superfície (PRESSWOOD, 1981).

De acordo com Metcalf e Eddy (2003), os processos de filtração por membranas incluem: microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose inversa, diálise e eletrodialise. Estes se distinguem entre si quanto à: natureza da força motriz; tamanho dos poros; mecanismo de separação e material das membranas. Os processos de membranas mais apropriados para obter uma água de qualidade desejável, dependem dos compostos a serem eliminados da água bruta.

A Figura 3 apresenta um esquema do processo de separação por membrana, com uma diferença de potencial atuando como força motriz. A fase I é chamada de concentrado ou retentado, sendo a própria

solução bruta a ser filtrada, enquanto a fase II é conhecida como permeado, que é a solução depois de filtrada (POKRYWIECKI, 2006).

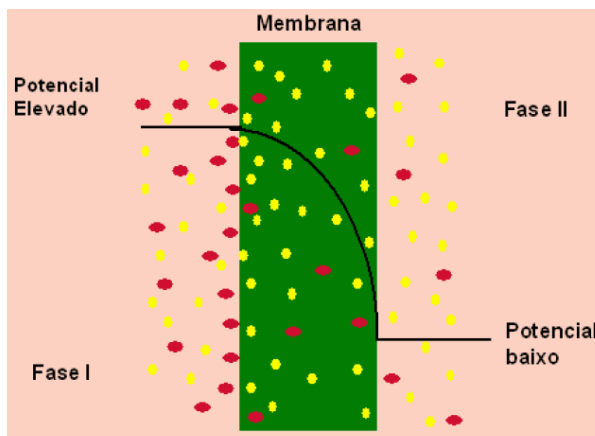


Figura 3: Esquema do processo de separação por membranas.
Fonte: Pokrywiecki (2006).

A separação utilizando membranas pode ocorrer por exclusão devido à diferença de tamanho entre as partículas ou moléculas e os poros da membrana ou por diferença na interação dos permeantes com o material que forma a membrana, através do mecanismo de sorção-difusão. Na primeira situação as membranas são consideradas porosas e o transporte ocorre preferencialmente através dos poros, predominando o mecanismo de transporte convectivo. Na segunda situação as membranas são consideradas densas, ou seja, o transporte dos permeantes ocorre por processos difusivos através dos espaços intersticiais do material que forma a membrana. Desta forma, a aplicação de determinada membrana depende basicamente de sua morfologia e do material que a constitui (MULDER, 1997).

As relações entre o tipo de processo de separação, a morfologia das membranas, a força motriz, o tipo de transporte esperado e as principais aplicações das mesmas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características das membranas comerciais.**Fonte: Nascimento (2004).**

Processo de Separação	Tipo de Membrana	Força Motriz	Mecanismo de Ação	Aplicações
Microfiltração (MF)	Microporosa	Gradiente de pressão (0,1-1 bar)	Exclusão	Clarificação, filtração estéril.
Ultrafiltração (UF)	Assimétrica	Gradiente de pressão (0,5-5 bar)	Exclusão	Separação de solutos macromoleculares.
Nanofiltração (NF)	Assimétrica	Gradiente de pressão (1,5–40 bar)	Exclusão / Difusão	Separação de compostos orgânicos e sais divalentes.
Osmose Inversa (OI)	Assimétrica Filme denso	Gradiente de pressão (10–80 bar)	Difusão	Separação de micro soluto e íons monovalentes.

A porosidade da membrana é um fator que possibilita a classificação dos processos, onde da microfiltração à osmose reversa o diâmetro dos poros vai decrescendo. Na Figura 4 os processos apresentados, que utilizam como força motriz a diferença de pressão, são classificados de acordo com o tamanho das partículas ou moléculas retidas. Quanto menor o tamanho da partícula, menor deve ser o tamanho do poro para retê-la e conseqüentemente maior a pressão aplicada. Observa-se que a nanofiltração e a osmose reversa são os processos mais eficientes na remoção de contaminantes, porém consomem maior energia devido à alta pressão de operação exigida (COSTA, 2009).

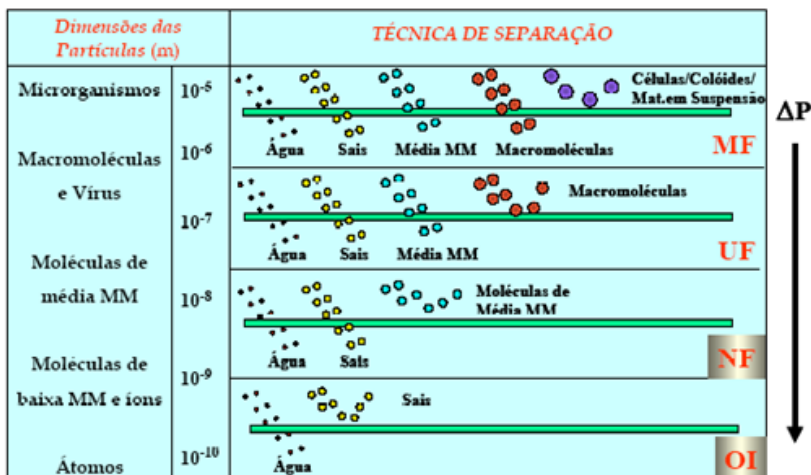


Figura 4: Classificação dos processos de separação por membranas, em função da porosidade. Fonte: Costa (2009).

No processo de separação por membranas existem dois métodos de filtração (Figura 5): o convencional (*dead-end*), onde o fluido escoar no sentido perpendicular à superfície da membrana, favorecendo uma colmatação mais rápida; e a tangencial (*cross-flow*), onde o escoamento do líquido é paralelo à superfície da membrana e a filtração ocorre tangencialmente, possibilitando ainda uma redução na colmatação devido à velocidade do escoamento do fluido realizar o arraste de sólidos que tendem a acumular na superfície (CHERYAN, 1998). Habert et al. (2006) relata que em processos de filtração tangencial, geralmente é realizada a recirculação do concentrado com a finalidade de extrair a maior quantidade possível de permeado.

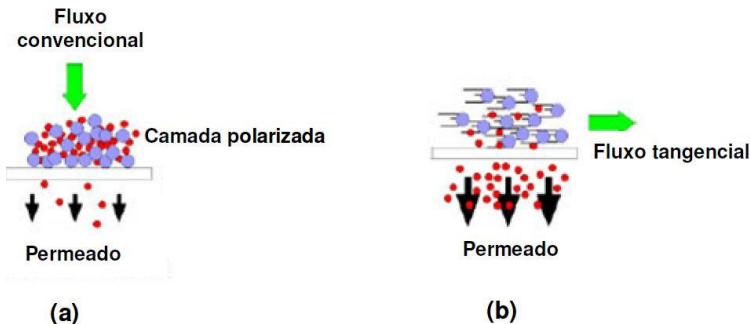


Figura 5: Representação dos fluxos aplicados em membranas:
a) convencional; b) tangencial. Fonte: Adaptado de Debon (2009).

A membrana pode ser produzida por uma grande variedade de materiais (CHERYAN, 1998). Existem duas classes de membranas sintéticas encontradas no comércio: as que são constituídas por materiais orgânicos (polímeros) e as inorgânicas, feitas de metal ou cerâmica. As membranas inorgânicas são as mais utilizadas, devido à sua maior resistência física e tolerância às altas temperaturas (PAULSON, WILSON E SPATZ, 1984; HABERT et al., 2006). As membranas cerâmicas são largamente utilizadas nos processo de microfiltração, pois são bem estáveis quimicamente e suportam grandes variações de pH (PELEGRIN, 2004). Em relação à sua geometria e configuração, as membranas podem apresentar quatro tipos: tubular, plana, espiral e fibra oca; sendo que cada tipo possui suas especificidades de operação (HABERT et al., 2006).

Durante os processos de filtração por membranas, impulsionados por gradientes de pressão, ocorre uma redução gradativa do fluxo do permeado com o passar do tempo. Tal declínio de fluxo está relacionado a três fenômenos associados: polarização da concentração, camada gel polarizada e entupimento da membrana (*fouling*). A polarização da concentração acontece devido ao aumento gradual da concentração de solutos na interface membrana/solução. Quando a concentração de partículas próximas à superfície excede o limite de solubilidade, ocorre a formação de uma camada de gel polarizada, ocasionando um aumento na resistência ao fluxo do permeado. O *fouling* é o entupimento dos poros, caracterizado pelo declínio do fluxo do permeado. Declínio que só pode ser revertido mediante limpeza química ou retrolavagem pressurizada (CHERYAN, 1998 e HABERT et al., 2006).

4. METODOLOGIA

4.1 DESCRIÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado em Florianópolis (SC), no Câmpus da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em um prédio que comporta diversos experimentos do programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental (Figura 6).

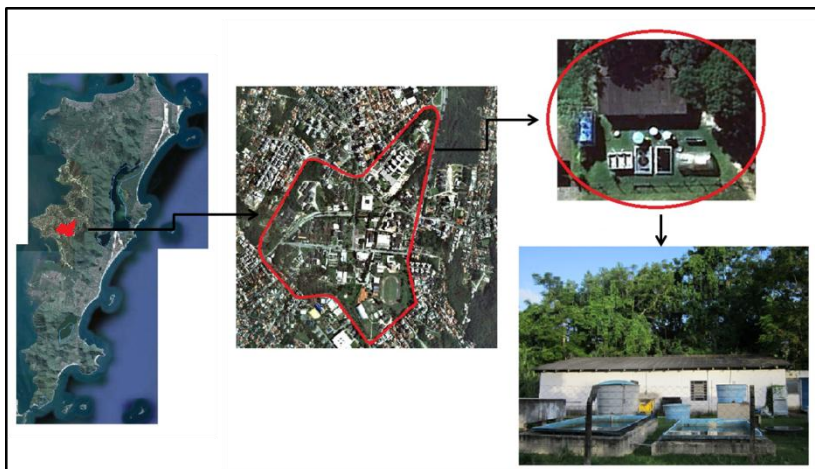


Figura 6: Localização da unidade experimental na UFSC.

A unidade experimental do projeto consiste em um sistema de captação de água de chuva e um piloto de microfiltração para tratamento da mesma (Figura 7). A superfície onde a água de chuva é captada, é um telhado de fibrocimento com aproximadamente 108 m² de área superficial. A água ao escoar pelo telhado é captada por calhas e direcionada, através de condutores verticais, passa por uma tela/peneira para remoção de folhas, galhos e/ou sólidos grosseiros (MAY, 2004), em seguida por um dispositivo descarte da primeira fração de chuva e posteriormente chega ao reservatório de armazenamento (1500 L), onde a partir do mesmo é bombeada para o reservatório da unidade piloto (Figura 8).

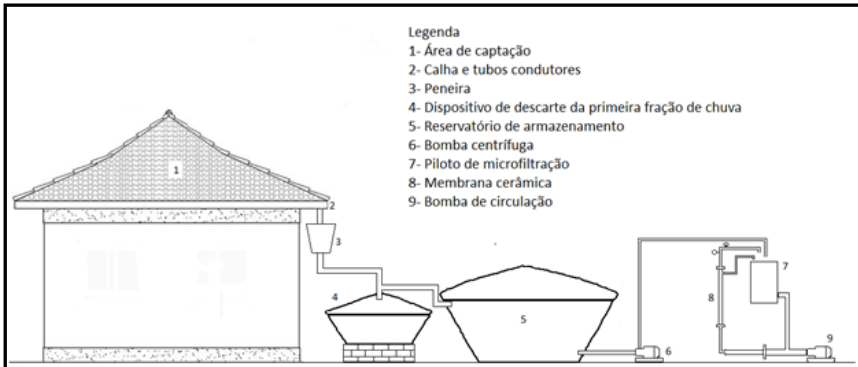


Figura 7: Esquema da unidade experimental: captação, descarte e tratamento da água da chuva.



Figura 8: Fotografia do sistema de captação de água de chuva: a) remoção de folhas, b) dispositivo de descarte da primeira fração da água, c) armazenamento.

A NBR 15527/07 recomenda que se descarte 2 mm da chuva inicial, pois a mesma é responsável pelo carreamento de partículas da atmosfera e impurezas depositadas na área de captação. Partindo dessa premissa, constata-se que um milímetro de chuva corresponde a um litro

de chuva distribuída em um metro quadrado de superfície, logo em um telhado com área de cento e oito metros quadrados, o descarte de dois milímetros corresponde a 216 litros de água, aproximadamente.

O dispositivo de descarte utilizado é uma caixa d'água de 310 litros adaptada para que quando a água da chuva atingir o volume determinado para descarte a mesma extravase para o reservatório de armazenamento através de uma ramificação no condutor vertical. Assim a água da chuva inicial, mais carregada de impurezas, fica retida no reservatório de descarte, o qual é esvaziado automaticamente após cada chuva, através de um pequeno orifício na parte inferior (Figura 9). A partir do reservatório de armazenamento, a água de chuva é bombeada para o reservatório da unidade piloto.



Figura 9: Fotografias do dispositivo de descarte da primeira fração da água de chuva.

4.2 UNIDADE PILOTO DE MICROFILTRAÇÃO

A unidade piloto é composta por um reservatório de 75 litros, uma bomba para circulação da água, um módulo de membrana cerâmica, válvulas, manômetros e painel eletrônico (Figura 10).

A membrana de microfiltração é cerâmica, cilíndrica, monotubular com 7 canais e possui 1,0 metro de comprimento. O diâmetro externo da membrana é de 25,4 mm, o diâmetro médio dos poros de 0,2 μm e o de cada canal é de 6,0 mm. Possui uma área superficial de 0,13 m^2 , pode atuar na faixa de pH de 1 a 14 e é fabricada pela Andritz®.

A partir do reservatório da unidade piloto a água de chuva bruta (afluente) é bombeada pelo interior da membrana de microfiltração, onde parte desta água é filtrada (permeado), passando pelos poros da membrana, e parte (concentrado) retorna ao reservatório, continuamente. A filtração é tangencial e ocorre de dentro para fora da membrana, ou seja, o concentrado escoar por dentro dos canais da membrana

retornando ao reservatório do piloto, enquanto o permeado transpassa as paredes da mesma, devido à pressão exercida sobre o líquido, e é direcionado para outro reservatório.



Figura 10: Fotografia da unidade piloto de microfiltração tangencial.

O piloto pode ser operado com variação dos parâmetros frequência e pressão, sendo que o primeiro está relacionado com a velocidade tangencial com que o líquido é circulado no interior da membrana e o segundo com a pressão exercida nas paredes da membrana. A frequência é controlada no painel de controle e a pressão é regulada através de uma válvula localizada logo após o módulo de filtração. A Figura 11 ilustra os componentes do equipamento de microfiltração.

A unidade possui um sistema de retrolavagem, através do qual em intervalos de tempo pré-definidos o permeado é retro impulsionado pelo interior dos canais da membrana, com o objetivo de carrear o material depositado na superfície dos poros. O permeado é retro impulsionado através de ar comprimido proveniente de um compressor. No painel de controle existem três temporizadores que regulam o dispositivo de retrolavagem: o primeiro regula de quanto em quanto tempo o sistema é acionado; o segundo regula o tempo que a válvula

eletropneumática leva para fechar e o terceiro temporizador controla o tempo de abertura da válvula solenóide (tempo de atuação do dispositivo).

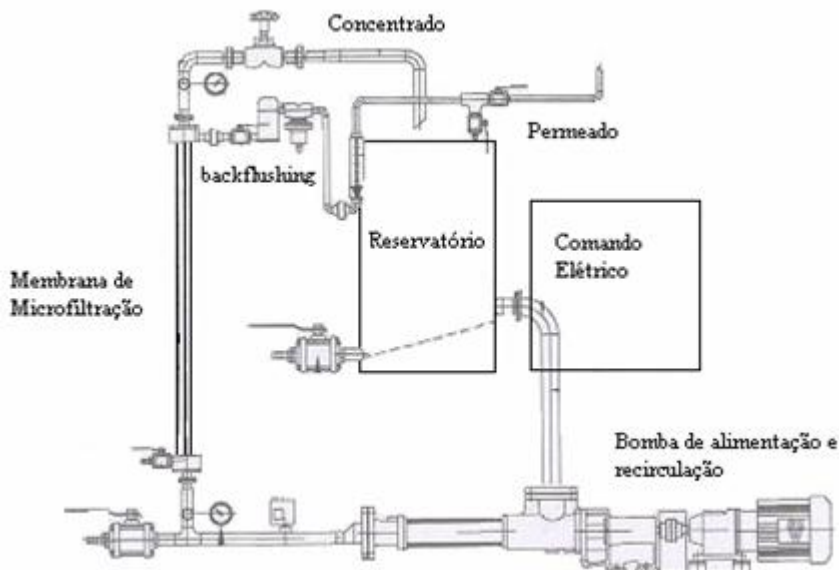


Figura 11: Esquema da unidade piloto com destaque dos componentes.
Fonte: Pelegrin (2004).

4.3 ENSAIOS DE MICROFILTRAÇÃO

4.3.1 Ensaios de microfiltração com água de torneira

Antes de operar o módulo de microfiltração com água de chuva foram realizados ensaios hidrodinâmicos com água de torneira (água tratada), para avaliar a capacidade de filtração das membranas na ausência de sólidos. A água destilada seria o líquido ideal para realizar tal ensaio, porém devido ao grande volume de água necessária foi inviável utilizá-la. Sabe-se que a água de torneira não é totalmente isenta de sólidos, porém foi utilizada por se considerar que a quantidade de sólidos presente não é significativa e por ser o recurso disponível.

Nestes ensaios o módulo de membrana cerâmica foi submetido a diferentes pressões de filtração e velocidades tangenciais, com a

finalidade de observar o comportamento do fluxo em diferentes condições de filtração (CAMPELLO, 2009).

Primeiramente foi realizado um ensaio, variando as condições de pressão (1,0, 1,5 e 2,0 bar) e frequência da bomba de recirculação (20, 30, 40, 50 e 60 Hz). Para cada pressão associada a cada frequência avaliou-se o fluxo do permeado em intervalos de tempo de 10 minutos, durante um período de 60 minutos. Este ensaio objetivou avaliar a influência da combinação desses parâmetros no fluxo do permeado.

Foi realizado também um ensaio deixando a válvula reguladora de pressão totalmente aberta, ou seja, com pressão inicial igual a zero, e aumentando a frequência gradativamente, verificando assim a influência da frequência no fluxo do permeado e na velocidade tangencial com que o líquido passa pelos canais da membrana.

A vazão do permeado foi obtida pela relação entre o volume de permeado coletado em uma proveta graduada e o tempo cronometrado para completar tal volume. A vazão de recirculação seguiu a mesma lógica, porém foi coletada a água que escoava pelo interior da membrana. O fluxo do permeado e a velocidade tangencial foram calculados através das equações (1) e (2).

$$Qp = \frac{Vol (L)}{t (s)}$$

$$Qp \left(\frac{L}{h} \right) = Qp \left(\frac{L}{s} \right) . 3600 (s)$$

$$Jp \left(\frac{L}{m^2 \cdot h} \right) = \frac{Qp \left(\frac{L}{h} \right)}{As (m^2)} \quad (1)$$

Onde:

Qp = Vazão do permeado (L.h⁻¹);

Jp = Fluxo do permeado (L.m².h⁻¹);

As= Área superficial de membrana (0,13 m²).

$$Vt \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{Qp \left(\frac{m^3}{s} \right)}{Ac (m^2)} \quad (2)$$

Onde:

Vt = Velocidade tangencial ($m.s^{-1}$);

Qr = Vazão de recirculação ($m^3.s^{-1}$);

Ac = Área Total dos canais (m^2) - equivalente à soma das áreas dos 7 canais da membrana.

4.3.2 Ensaios de microfiltração tangencial com água de chuva

A partir dos ensaios com água de torneira foi possível verificar valores de frequência e pressão que proporcionaram melhores fluxos de permeação e escolher uma faixa de valores destes parâmetros para operar com água de chuva.

Os ensaios de microfiltração com água de chuva foram realizados com a finalidade de conhecer o comportamento do fluxo da água de chuva durante a filtração, assim como a qualidade da mesma antes e depois do tratamento. Para isso foram estipulados 9 ensaios, durante ou posterior a eventos chuvosos, em batelada, com duração de 120 minutos de filtração e acompanhamento do fluxo de permeado em intervalos de tempos pré-definidos. Os intervalos de tempo foram definidos de acordo com experiências verificadas por Pelegrin (2004), Vidal (2006) e Campello (2009) que apontavam que o fluxo do permeado tende a cair bruscamente no início da filtração e a estabilizar com o passar do tempo. Logo, foi estipulada a seguinte sequência de intervalos na coleta de permeado: 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 90 e 120 minutos de filtração.

Foram realizados também ensaios com o acionamento do mecanismo de retrolavagem (*backflushing*), nas mesmas condições de pressão e frequência dos ensaios sem este mecanismo, com a finalidade de comparar os resultados e avaliar a contribuição da retrolavagem na redução da colmatção da membrana durante os ensaios. O mecanismo de *backflushing* é acionado no painel de controle e é controlado por três temporizadores. O primeiro regula de quanto em quanto tempo o sistema é acionado e foi fixado em 1 minuto; o segundo regula o tempo que a válvula eletropneumática leva para fechar e foi fixado em 1,5 segundos; e o terceiro temporizador controla o tempo de abertura da válvula solenoide (tempo de atuação do dispositivo) e foi fixado em 2

segundos. No momento da retrolavagem, a válvula eletropneumática fecha impedindo a passagem do permeado, logo em seguida a válvula solenóide é aberta, permitindo a passagem do ar comprimido, que impulsiona o permeado contido em um recipiente embutido no próprio equipamento, no sentido contrário ao fluxo. A pressão recomendada pelo fabricante para retropopulsão é de 1,0 bar acima da pressão utilizada na filtração, sendo que este ajuste pode ser feito no filtro regulador de ar instalado na unidade.

Antes e após cada ensaio de microfiltração com água de chuva foram realizados ensaios de filtração com água de torneira. Assim se tinha um fluxo inicial com a membrana limpa e um fluxo final com a membrana colmatada. Como a filtração com água de torneira é realizada na praticamente sem sólidos foi possível estabelecer, pela diferença destes fluxos, a influência do *fouling* (colmatção) na redução de permeabilidade da membrana. A porcentagem de *fouling* (%F) é calculada através da equação (3), proposta por Balakrishman et al. (2001) apud Nishi (2011):

$$\%F = \frac{(Ji - Jf)}{100} \quad (3)$$

Onde:

Ji: Fluxo inicial com água de torneira (membrana limpa);

Jf: Fluxo final com água de torneira (membrana colmatada).

4.4 LIMPEZA DA MEMBRANA

Após cada ensaio, foi realizada uma limpeza química na membrana, conforme recomendação do fabricante, com a finalidade de remover o *fouling* depositado na superfície filtrante da membrana.

A limpeza na membrana é necessária, pois a mesma fica impregnada com materiais aderidos em sua superfície filtrante. O fabricante recomenda que seja realizada a limpeza química, em uma sequência de três estágios:

- Limpeza alcalina: com solução de hidróxido de sódio (NaOH) – concentração máxima de 2,0%;
- Limpeza ácida: com solução de ácido nítrico (HNO₃) – concentração máxima de 2,0%;

- Limpeza neutra: com detergente neutro com baixa capacidade de formar espuma.

A limpeza CIP (*Clean in Place* - Lavagem no local), como é chamada no manual de instruções do piloto utilizado, é realizada seguindo uma série de procedimentos, descritos a seguir:

- A unidade é drenada, através da abertura de todas as válvulas;
- A válvula reguladora permanece aberta durante o processo e as demais válvulas permanecem fechadas;
- O sistema de retropropulsão deve permanecer desligado;
- O reservatório é completado com água e a mesma é recirculada por 15 minutos;
- A unidade é drenada, conforme descrito no primeiro item;
- O reservatório é preenchido com a solução básica e a mesma é recirculada por 40 minutos;
- A unidade é drenada e em seguida preenchida com água, a qual é recirculada por 15 minutos;
- A unidade é drenada;
- O reservatório é preenchido com a solução ácida e a mesma recirculada por 40 minutos;
- O reservatório é drenado e em seguida preenchido com água, a qual é recirculada por 15 minutos;
- A unidade é drenada e em seguida preenchida com solução de detergente neutro ou água sanitária, que é recirculada por 15 minutos;
- O reservatório é drenado e em seguida preenchido com água, a qual é recirculada por 40 minutos;
- A unidade é drenada e está pronta para uso.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DA CHUVA

4.5.1 Coleta de amostras

Inicialmente as coletas de água foram realizadas em dois pontos do sistema: amostras de água bruta no reservatório inferior (afluente à microfiltração) e amostras de água filtrada no reservatório do piloto (permeado). Após um mês do início dos ensaios um novo ponto de coleta foi adicionado ao experimento. A água da chuva passou a ser coletada diretamente da atmosfera através de uma bacia colocada em um suporte a um metro de altura do nível do solo, para verificar a influência

da área de captação na qualidade da água. Para o afluente e para a água da chuva direto da atmosfera foram coletadas amostras simples, já para o permeado as amostras foram compostas, coletadas em diferentes tempos durante o ensaio de microfiltração.

4.5.2 Análises físico-químicas e bacteriológicas

Para caracterizar a água de chuva coletada, assim como a água de chuva filtrada (permeado) no piloto de microfiltração foram realizadas análises físico-químicas e bacteriológicas, com a finalidade de verificar o desempenho do sistema de tratamento proposto na potabilização da água de chuva. Os parâmetros analisados foram: pH, cor, turbidez, alcalinidade, dureza, coliformes totais e termotolerantes. Tais parâmetros foram estabelecidos com base nos trabalhos de Jaques (2005), Peters (2006) e Martins (2008) que constataram que a água da chuva na região de Florianópolis não apresenta níveis elevados de contaminação química.

Os resultados das análises foram comparados com os limites estabelecidos pela Portaria Nº 2914 de 12 de Dezembro 2011 do Ministério da Saúde que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

As análises foram realizadas no Laboratório de Reúso de Água (LaRA) e no Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), ambos do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC. Os parâmetros analisados e técnicas analíticas utilizadas, segundo Standard Methods for the Examination of water and wastewater (APHA, 2005), seguem listados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros analisados e as respectivas técnicas analíticas.

Parâmetros	Método analítico	Unidades
Alcalinidade total	Titulométrico (Ácido Sulfúrico 0,002N)	mg.L ⁻¹
Coliformes totais e termotolerantes	Colilert®	NMP/100ml
Cor	Fotométrico (Espectrofotômetro Hach DR 2010)	mg.L ⁻¹ PtCo
Dureza	Titulométrico (EDTA)	mg.L ⁻¹
pH	Potenciométrico (pHmetro)	-
Turbidez	Nefelométrico (Turbidímetro Hach 2100P)	UNT

4.6 ESTIMATIVA DE VOLUME DE CHUVA PARA CAPTAÇÃO

A partir de uma série histórica de dez anos de precipitações, fornecida pela EPAGRI, de uma estação meteorológica localizada no bairro Itacorubi (Latitude: 27°38'50" S, Longitude: 48°30' O e Altitude: 2 metros), no município de Florianópolis foi realizada uma estimativa do volume de água da chuva disponível para captação.

Os dados pluviométricos fornecidos apresentam a média mensal de precipitação expressa em milímetros de chuva. Cada milímetro de chuva corresponde a um litro de chuva distribuído em um metro quadrado de superfície. A partir dos dados pluviométricos foi estimado o volume disponível para captação por mês e por ano, em litros por metro quadrado e em metros cúbicos para a área de captação utilizada nesta pesquisa.

O coeficiente de escoamento superficial, ou coeficiente de *runoff* (C), expressa a relação entre o volume de chuva escoado por uma superfície e o volume total precipitado, variando com o tipo de superfície. Para a superfície em questão (telhado de fibrocimento) foi adotado o valor de C=0,8, que indica que apenas 80% do volume precipitado estará disponível para captação.

5. RESULTADOS

5.1 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS COM ÁGUA DE TORNEIRA

Os ensaios hidrodinâmicos com água de torneira foram realizados com a finalidade de conhecer as condições operacionais da membrana de microfiltração e também para avaliar a capacidade de filtração das membranas na “ausência” (baixa concentração) de sólidos.

5.1.1 Relação entre a frequência e a velocidade tangencial

A frequência é uma referência à rotação do motor da bomba de recirculação, o que indica uma relação positiva com a velocidade tangencial com que a água de recirculação passa pelo interior dos canais da membrana. A relação entre estes parâmetros é mostrada na Figura 12.

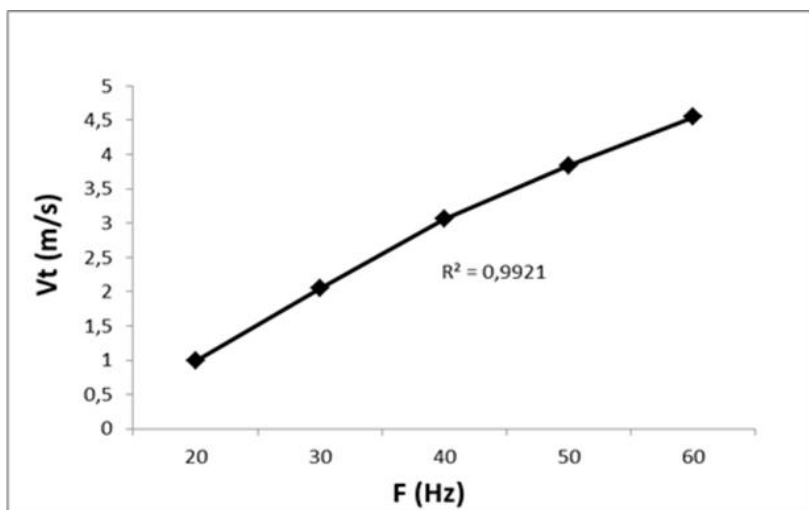


Figura 12: Relação entre a frequência de rotação da bomba de alimentação e a velocidade tangencial da água de torneira.

O coeficiente de correlação entre a velocidade tangencial e a frequência de rotação da bomba foi de 0,9921 demonstrando uma relação positiva entre estes parâmetros e que um influencia o outro diretamente. Assim, como mostrado na Figura 12, o aumento na

frequência foi acompanhando linearmente pelo aumento da velocidade tangencial.

A válvula reguladora de pressão foi deixada totalmente aberta, o que não quer dizer que não houve influência da pressão, pois a pressão era zero somente no início do ensaio e ao aumentar a frequência, a pressão era elevada também consequentemente devido ao atrito criado nas paredes da membrana, pelo aumento da velocidade com que a água escoava pelo interior dos canais da membrana.

5.1.2 Relação entre a frequência e o fluxo do permeado

Neste caso foi avaliada a influência da variação da frequência no fluxo do permeado. A válvula reguladora de pressão foi deixada totalmente aberta. A Figura 13 mostra a relação entre esses parâmetros.

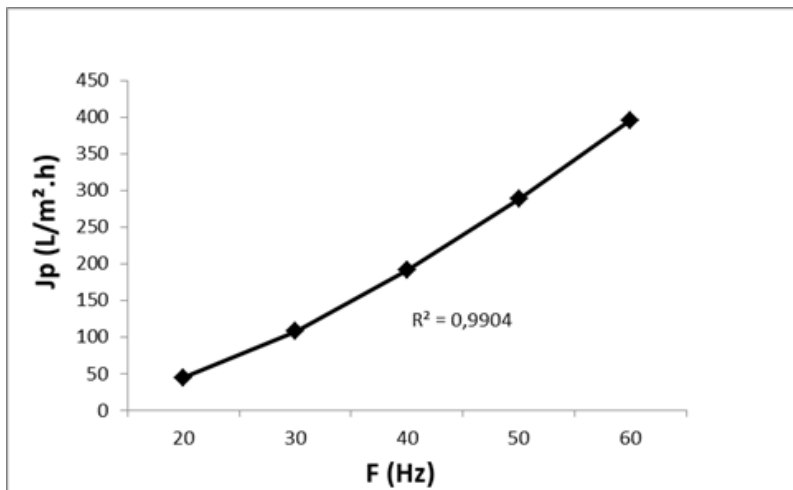


Figura 13: Relação entre a frequência de rotação da bomba de alimentação e o fluxo do permeado.

O coeficiente de correlação entre a frequência e o fluxo do permeado foi de 0,9904 demonstrando uma relação positiva de influência direta de um parâmetro sobre o outro. À medida que se aumentava a frequência, notou-se um aumento no fluxo do permeado de forma praticamente linear. Pelegrin (2004) também observou uma relação positiva entre a frequência e o fluxo do permeado nos ensaios

realizados com água de torneira em um piloto de microfiltração tangencial.

Porém, vale ressaltar que ao aumentar a frequência verificou-se um aumento de pressão no manômetro, mesmo com a válvula reguladora de pressão totalmente aberta, o que indica que o aumento do fluxo não se deu exclusivamente pelo aumento da frequência, mas em conjunto com o aumento da pressão. Indicando mais uma vez que a influência dos parâmetros frequência e pressão no fluxo do permeado, não pode ser avaliada separadamente na unidade piloto utilizada.

5.1.3 Relação entre frequência, pressão e fluxo do permeado

Os ensaios de microfiltração tangencial realizados com água de torneira demonstraram que os fluxos do permeado tendem a permanecer constantes durante o ensaio pelo fato da água de torneira possuir baixas concentrações de sólidos, que são os causadores do *fouling*. Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos ensaios realizados por um período de uma hora para cada combinação de frequência e pressão, com medição do fluxo do permeado a cada 10 minutos.

Tabela 3: Média de fluxos de permeado nos ensaios de microfiltração tangencial com água de torneira.

Frequência (Hz)	Pressão (bar)	Jp (L.m ⁻² .h ⁻¹)		
		Jmáximo	Jmínimo	Jmédio (n=7)
F = 20	P = 1,0	609,2	609,2	609,2
	P = 1,5	941,5	941,5	941,5
	P = 2,0	1273,8	1218,5	1254,1
F = 30	P = 1,0	664,6	636,9	660,7
	P = 1,5	941,5	941,5	941,5
	P = 2,0	1273,8	1246,5	1254,1
F = 40	P = 1,0	720,0	720,0	720,0
	P = 1,5	941,5	913,8	921,7
	P = 2,0	1273,8	1218,6	1230,4
F = 50	P = 1,0	720,0	720,0	720,0
	P = 1,5	886,2	858,5	866,4
	P = 2,0	1080,0	1052,3	1060,2
F = 60	P = 1,0	609,2	609,2	609,2
	P = 1,5	803,1	775,4	792,3
	P = 2,0	913,8	886,2	898,0

O piloto utilizado na pesquisa possui uma única bomba para alimentação e recirculação, o que o torna um pouco limitado em termos de monitoramento. Não foi possível analisar isoladamente a influência dos parâmetros de pressão e frequência no fluxo do permeado, visto que ambos são influenciados pela bomba de alimentação/recirculação. Por exemplo, com a válvula reguladora de pressão totalmente aberta (P=0), ao aumentar a frequência da bomba, a pressão aumenta conjuntamente.

O aumento da pressão em todas as frequências foi acompanhado de um aumento do fluxo, o que sugere a influência da pressão no fluxo do permeado. Pelegrin (2004) também observou que a variação da pressão exerce uma influência direta sobre o fluxo do permeado.

Através da Tabela 3 pode-se perceber que o aumento da frequência da bomba produz um aumento no fluxo do permeado somente em determinadas pressões. Para a pressão de 1,0 bar o fluxo aumenta com o aumento da frequência até 40 Hz e em 60 Hz diminui.

Para a pressão de 1,5 bar, o fluxo permanece constante em 20 e 30 Hz e a nas frequências seguintes vai diminuindo, e o mesmo acontece para a pressão de 2,0 bar.

Valle, Pinheiro e Siqueira (2009) realizaram testes hidrodinâmicos com água destilada em um piloto de microfiltração e concluíram através de análise estatística que dentre os parâmetros estudados (pressão média, temperatura e pressão transmembrana) o que exerce maior influência sobre o fluxo do permeado é a pressão média aplicada.

Para fluidos sem componentes que possam causar colmatação, altas pressões podem resultar em aumento de fluxo, porém para fluidos com presença de sólidos o aumento da pressão pode causar uma compactação de partículas na superfície da membrana ocasionando uma redução de fluxo. Logo, para valores mais baixos de pressão se tem um fluxo inicial mais baixo, que é mantido ao longo do tempo de filtração (Porter, 1990 apud Kaster, 2009).

O maior fluxo observado neste ensaio foi com pressão de 2,0 bar e frequência de 30 Hz, porém com tal pressão nota-se uma sobrecarga no equipamento piloto, com fortes vibrações no mesmo durante o ensaio. Pelegrin (2004) utilizando um piloto de microfiltração, no tratamento de efluente proveniente do sistema de lodos ativados de uma ETE, notou que os melhores fluxos foram obtidos com a maior pressão (2,0 bar), porém verificou que altas pressões causam instabilidade no ponteiro do manômetro e tremores na estrutura física do piloto. A partir destas informações foi escolhido trabalhar, nos ensaios com água da chuva, com as pressões de 1,0 e 1,5 bar, juntamente com as frequências de 30 e 40 Hz que foram as que apresentaram melhores resultados com as pressões escolhidas. Pôde-se observar que a pressão exerce uma maior influência do que a frequência sobre o fluxo do permeado, porém não foi possível avaliar tal influência separadamente, pois as duas condições operacionais influenciam conjuntamente o fluxo do permeado.

5.2 ENSAIOS DE MICROFILTRAÇÃO TANGENCIAL COM ÁGUA DE CHUVA

Foram realizados nove ensaios com água de chuva, sendo que cada par de ensaio (com e sem utilização do *backflushing*) foi realizado em um evento chuvoso distinto e com as mesmas condições operacionais. As condições operacionais, assim como a data e os resultados qualitativos de água de chuva estão apresentados na Tabela 4, onde o afluente representa a água de chuva armazenada no reservatório inferior, a qual foi submetida aos ensaios de microfiltração e o permeado é a água da chuva depois do processo de microfiltração. O primeiro e o segundo ensaio foram realizados com as mesmas condições operacionais, mas o primeiro ensaio foi um teste para verificar o comportamento do fluxo durante o procedimento de filtração, por isso não foi colocado na Tabela 4. Ao longo deste capítulo, os ensaios serão discutidos em termos de fluxos e qualidade do afluente e do permeado.

Tabela 4: Resumo das características físico químicas e bacteriológicas da água de chuva, antes e após os ensaios de microfiltração.

Datas dos Ensaios		30/08/11	09/09/11	13/10/11	16/11/11	01/12/11	07/12/11	15/12/11	25/01/12
Sequência de Ensaios		2º	3º ***	4º	5º ***	6º	7º ***	8º	9º ***
Condições Operacionais		P=1,5 bar	P=1,5 Bar	P=1,0 Bar	P=1,0 Bar	P=1,0 Bar	P=1,0 Bar	P=1,5 Bar	P=1,5 Bar
		f= 30 Hz	f=30 Hz	f=30 Hz	f=30 Hz	f=40 Hz	f=40 Hz	f=40 Hz	f=40 Hz
pH	Afluentes	6,8	6,9	7	7	7	7,1	6,9	6,9
	Permeado	6,9	6,9	7,1	6,9	7,2	7	6,9	6,9
Cor (mg.L ⁻¹ PtCo)	Afluentes	45	26	51	35	45	52	20	54
	Permeado	8	2	11	4	8	11	5	8
Turbidez (UNT)	Afluentes	3,3	3	2,6	1,8	2,4	1,8	1	3
	Permeado	0,14	0,2	0,2	0,1	0,16	0,2	0,1	0,25
Alcalinidade (mg.L ⁻¹ CaCO ₃)	Afluentes	10	9	10	10	15	20	15	10
	Permeado	8	8	8	6	14	16	8	11
Dureza (mg.L ⁻¹ CaCO ₃)	Afluentes	27	25	26	34	58	44	48	34
	Permeado	24	20	24	30	55	34	44	30
Coliformes totais (NMP/100ml)	Afluentes	1,70E+05	3,40E+03	2,50E+05	1,30E+04	7,30E+04	4,10E+04	5,80E+04	3,80E+04
	Permeado	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Coliformes termotolerantes (NMP/100ml)	Afluentes	750	300	450	160	31,5	1900	2700	540
	Permeado	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente

*** Ensaios com *backflushing*

5.2.1 Análise do fluxo do permeado

Os ensaios hidrodinâmicos com água de chuva buscaram relacionar os parâmetros de pressão e frequência com o fluxo do permeado, fixando a cada ensaio combinação de valores destes parâmetros. Segundo Malack e Anderson (1997), realizar modificações nos parâmetros operacionais de equipamentos de microfiltração pode melhorar o desempenho de filtração e produção de permeado. Assim, foram fixados para os ensaios de microfiltração tangencial de água de chuva os valores de frequência de 30 e 40 Hz, relacionados com as pressões de 1,0 e 1,5 bar, conforme mostra as Figuras 14 e 15. Tais frequências e pressões foram baseadas nos resultados obtidos nos ensaios hidrodinâmicos com água de torneira.

Os fluxos permeados nos ensaios realizados com frequência de 30 Hz não tiveram grande diferença entre si, nas pressões de 1,0 e 1,5 bar, como mostra a Figura 14. Para a maior pressão (1,5 bar) o fluxo inicial foi consideravelmente mais alto, porém ao final praticamente se equiparou ao fluxo final de pressão de 1,0 bar. Segundo Kromkamp et al. (2007), o desempenho da microfiltração na separação de partículas é influenciado pelo tipo de partículas presentes no fluido, assim como influencia na deposição das mesmas sobre a membrana. Cheryan (1998) constatou que o aumento da pressão tende a aumentar o fluxo do permeado até a consolidação da camada gel na superfície da membrana e após isso o fluxo tende a se tornar independente da pressão.

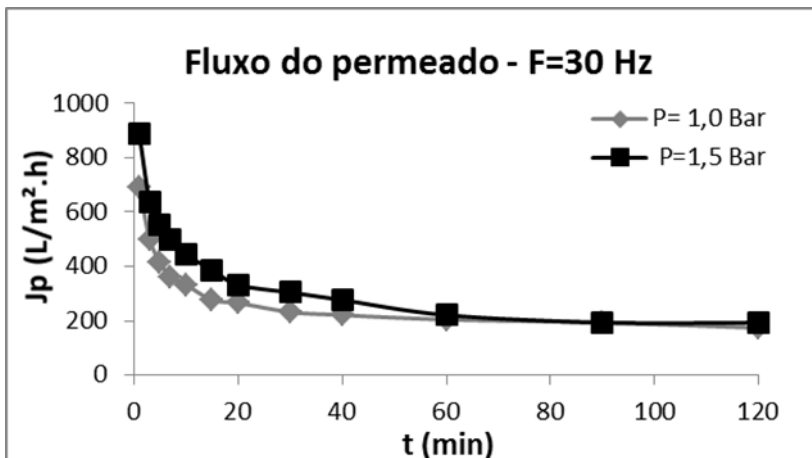


Figura 14: Influência da pressão e frequência (30 Hz) no fluxo do permeado de água de chuva.

Os fluxos de ambos os ensaios tenderam a se estabilizar próximo dos 40 minutos de ensaio e ambos perderam mais de 70% do fluxo inicial ao longo do ensaio. Nóbrega, Borges e Habert (2005) afirmaram que na operação de microfiltração com escoamento tangencial é comum a queda inicial nos valores do fluxo, com estabilidade posterior no decorrer do processo.

Nos ensaios realizados com frequência de 40 Hz, os fluxos foram bem distintos para as pressões de 1,0 e 1,5 bar, conforme a Figura 15. O fluxo inicial, na pressão de 1,5 bar, foi consideravelmente maior do que para a pressão de 1,0 bar, o que pode demonstrar que nesta frequência a pressão exerceu uma influência mais acentuada sobre o fluxo do permeado. Segundo Nóbrega, Borges e Habert (2005), em processos de filtração por membranas que utilizam gradiente de pressão como força motriz, os fluxos são proporcionais à pressão empregada.

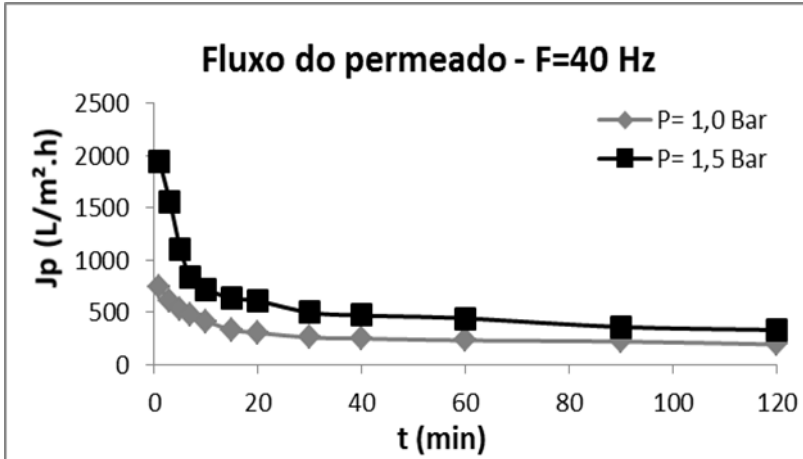


Figura 15: Influência da pressão e frequência (40 Hz) no fluxo do permeado de água de chuva.

Pode-se observar também que o fluxo na pressão de 1,5 bar, apesar de ter sido muito alto no início teve uma perda de fluxo de 82,5% ao longo do ensaio, enquanto que o fluxo na menor pressão perdeu aproximadamente 74%. Rippeger (2002) e Pelegrin (2004) constataram que ocorre um declínio de fluxo ao longo de um ensaio de microfiltração devido à formação da camada gel, pelo acúmulo de sólidos na superfície da membrana e devido ao bloqueio dos poros da membrana por entupimento. Isso demonstra que com uma maior pressão aplicada pode-se obter um maior fluxo inicial, porém uma maior deposição de partículas sobre a membrana e consequentemente uma maior perda de fluxo.

Gésan-Guiziou, Boyaval e Daufin (1999) afirmaram que para um melhor fluxo de permeado, credita-se uma melhor eficiência do processo de filtração. Assim, os fluxos finais foram de 193,85 e 332,3 L.m⁻².h⁻¹ para as pressões de 1,0 e 1,5 bar respectivamente, indicando uma maior eficiência, em relação ao fluxo, para a pressão de 1,5 bar, na frequência de 40 Hz.

Valle, Pinheiro e Siqueira (2009) realizaram ensaios de microfiltração com água de chuva e constataram que dentre os parâmetros analisados (pressão média, temperatura e pressão transmembrana), a pressão média exerceu a maior influência direta no fluxo do permeado, ou seja, o aumento da pressão aplicada produz um aumento de fluxo. A temperatura se mostrou como segunda opção de

maior influência, porém depende da pressão média para a atuação ser mais significativa. A influência da pressão no fluxo do permeado foi verificada nos ensaios realizados, onde sempre o maior fluxo final estava relacionado com a maior pressão aplicada.

5.2.2 Influência da descolmatação (*Backflushing*) no fluxo do permeado

O mecanismo de *backflushing* foi utilizado nos ensaios com o intuito de avaliar a sua influência na redução do *fouling* e consequentemente na redução de perda de fluxo. Foram comparados ensaios com as mesmas condições operacionais (pressão e frequência), sendo um ensaio utilizando o mecanismo de descolmatação e outro não. O *backflushing* foi programado para ser acionado em intervalos de tempo de 1 minuto, por ser o menor intervalo ajustável no equipamento.

Pode ser observado na Figura 16, os ensaios realizados com 1,0 bar de pressão e 30 Hz de frequência, indicando que, neste caso, o mecanismo não resultou em uma diferença significativa em termos de fluxo de permeado e redução de *fouling*. No ensaio onde foi acionado o *backflushing* o fluxo final foi de 188,3 L.m².h⁻¹, enquanto no ensaio onde o mesmo não foi acionado obteve-se um fluxo final de 176,5 L.m².h⁻¹. O mecanismo de *backflushing* pode não ter resultado em uma diferença significativa no fluxo do permeado pelo fato de o líquido filtrado (água de chuva) não possuir elevadas concentrações de sólidos, o qual não causa uma colmatação muito grande.

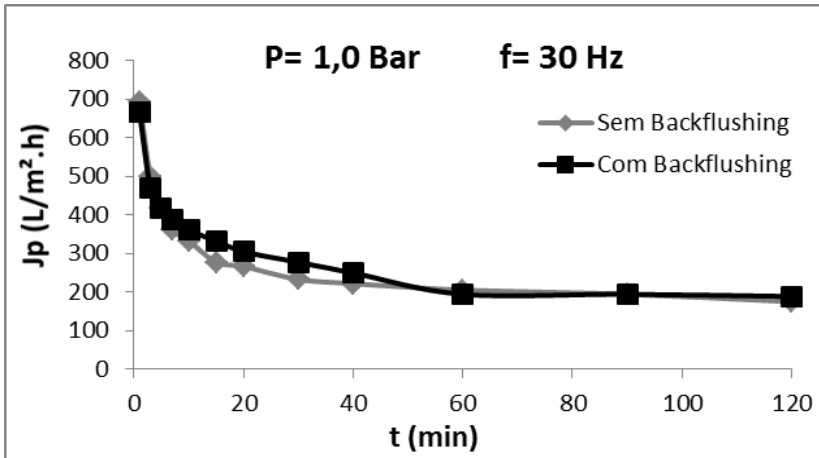


Figura 16: Comparação entre os fluxos do permeado de água de chuva, com e sem a utilização do mecanismo de *backflushing* (P=1,0 Bar e f=30 Hz).

Nos ensaios que foram realizados com frequência de 30 Hz e pressão de 1,5 bar já houve uma diferença significativa nos fluxos do permeado, quando comparada a utilização do mecanismo de *backflushing*, conforme ilustra a Figura 17. No ensaio em que foi acionado o mecanismo de *backflushing*, o fluxo inicial do permeado foi maior e houve uma menor queda no fluxo, garantindo assim um maior fluxo final também. Neste caso observa-se que o mecanismo desempenhou sua função pré-estabelecida, garantindo uma aparente redução de *fouling* e de perda de fluxo.

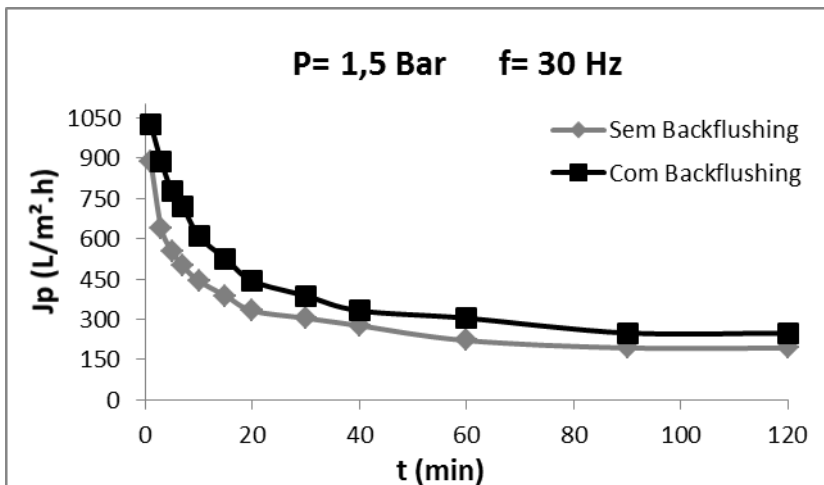


Figura 17: Comparação entre os fluxos do permeado de água de chuva, com e sem a utilização do mecanismo de *backflushing* (P=1,5 bar e f=30 Hz).

Pelegrin (2004) realizou ensaios de microfiltração tangencial utilizando mecanismo de *backflushing* em intervalos de tempo de 0,5; 1; 2 e 5 minutos durante a filtração. Observou que os ensaios em que se utilizou o mecanismo com intervalos de tempo de 5, 2 e 1 minuto, os valores dos fluxos finais foram similares aos valores do ensaio sem a utilização do mecanismo. Porém no ensaio em que o *backflushing* era acionado a cada 0,5 minuto foi obtido um melhor desempenho em termos de fluxo final de permeado, constatando assim que o melhor desempenho do *backflushing* se dá em menores intervalos de tempo de acionamento.

Sondhi et al. (2000) constataram, em seus ensaios utilizando o mecanismo de *backflushing*, com acionamento a cada 0,5 minutos em microfiltração tangencial com membrana de alumínio, que o mecanismo atuou de forma satisfatória, promovendo bons resultados em termos de fluxo.

Nos ensaios realizados com pressão de 1,0 bar e frequência de 40 Hz, a utilização do mecanismo de *backflushing* apresentou um desempenho superior, em termos de fluxo, quando comparada com a não utilização, como apresentado na Figura 18. Porém esta diferença não foi muito significativa, pois o fluxo final com o *backflushing* foi de $249,2 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, enquanto sem o dispositivo foi de $193,8 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$.

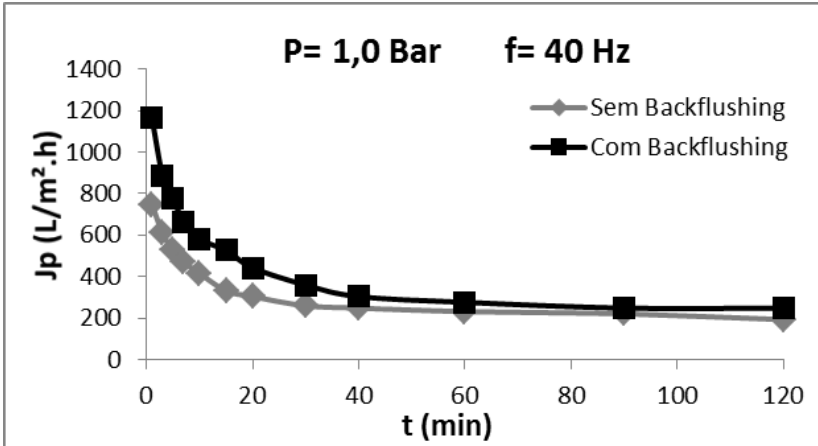


Figura 18: Comparação entre os fluxos do permeado de água de chuva, com e sem a utilização do mecanismo de *backflushing* (P=1,0 Bar e f=40 Hz).

Vidal (2006) através da realização de ensaios de microfiltração, com efluente proveniente do tanque de aeração de uma ETE, com retrolavagem da membrana, concluiu que a mesma foi essencial para a obtenção de maiores fluxos de permeado. Foram realizados ensaios com diferentes intervalos de tempo de acionamento do mecanismo de retrolavagem, 15, 10 e 4 minutos. O autor afirma que os melhores resultados se deram com o menor intervalo de tempo entre os pulsos de retrolavagem, atribuindo o desempenho ao consequente maior número de pulsos realizados durante o ensaio, o que permitiu uma remoção mais eficiente dos sólidos depositados na superfície da membrana. Nos ensaios com intervalos de 10 e 15 minutos os fluxos foram semelhantes, mesmo assim atingiram valores maiores que no ensaio sem a retrolavagem da membrana.

Nos ensaios realizados com pressão e frequência de 1,5 bar e 40 Hz, respectivamente, os resultados foram inusitados, pois o fluxo final do ensaio sem o acionamento do *backflushing* foi maior do que com a utilização do dispositivo. Este resultado contrário aos outros realizados anteriormente, se deve possivelmente à problemas operacionais no equipamento, especificamente no dispositivo de descolmatação, por isso o gráfico não foi apresentado.

5.2.3 Porcentagem de *fouling*

A porcentagem de *fouling* (%F) representa a redução do fluxo da água de torneira após o ensaio com água de chuva. Foram calculadas tanto para os ensaios sem a utilização do mecanismo de retrolavagem como para os ensaios com a utilização do mesmo. A Figura 19 apresenta as porcentagens de *fouling*, através das quais foi possível comparar os resultados e avaliar a influência do *backflushing* na redução da colmatação da membrana. Os ensaios de microfiltração foram agrupados de acordo com as condições operacionais de pressão e frequência.

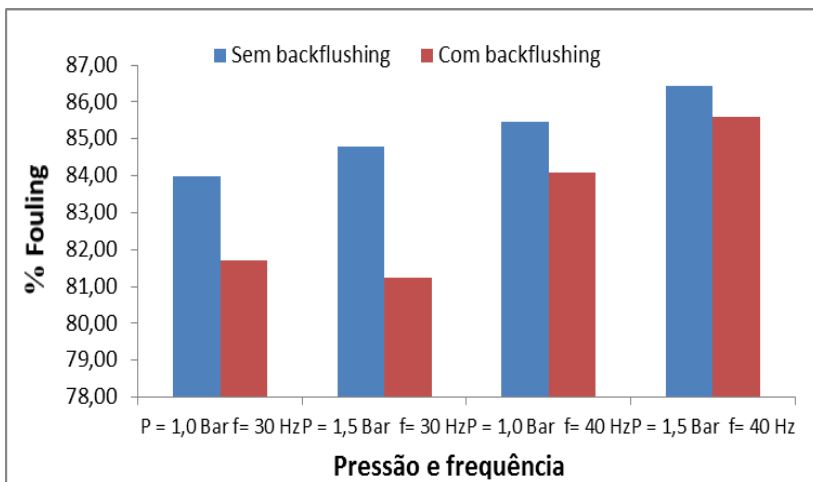


Figura 19: Comparação da porcentagem de *fouling* nos ensaios de microfiltração com água de chuva, com e sem o acionamento do mecanismo de *backflushing*.

Nos ensaios em que o mecanismo de *backflushing* não foi acionado a porcentagem de *fouling* foi relativamente alta variando de 84 a 86% aproximadamente. Nota-se, agrupando os ensaios por frequência, que ao aumentar a pressão há um aumento no *fouling*, o que está de acordo com a constatação de Porter (1990) apud Kaster (2009) que para fluidos com presença de sólidos, um aumento de pressão pode causar uma compactação de partículas na superfície da membrana (colmatação).

O mecanismo de retrolavagem proporcionou uma redução de *fouling* em todos os ensaios, porém é possível notar que a maior eficiência no mecanismo se deu no ensaio com pressão de 1,5 bar e frequência de 30 Hz. No ensaio com as condições extremas (maior

frequência e maior pressão) observou uma maior colmatação e menor redução de *fouling* pelo mecanismo de retrolavagem.

5.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E BACTERIOLÓGICAS

5.3.1 pH

Os valores do pH da água da chuva, tanto para a água bruta do reservatório como para o permeado, se mantiveram na faixa da neutralidade. A portaria 2914/2011 do MS estipula que a água potável deve ter o pH na faixa de 6,5 a 9,0. A Figura 21 mostra a variação do pH da água de chuva ao longo dos ensaios de microfiltração.

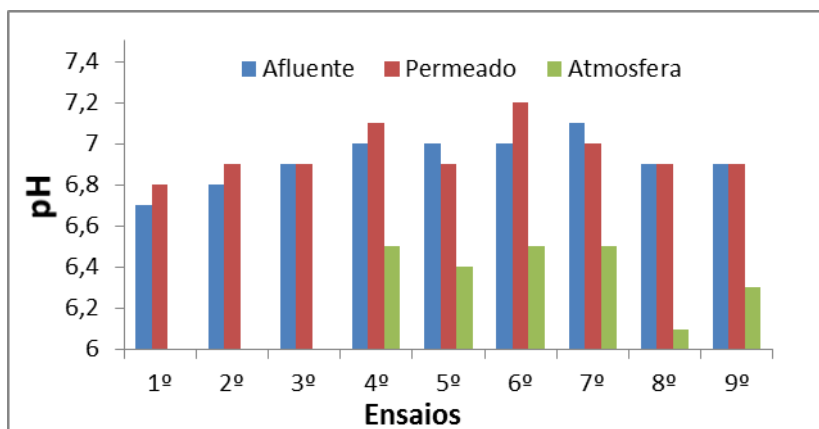


Figura 20: Variação do pH da água da chuva ao longo dos ensaios de microfiltração.

Jaques (2005) e Martins (2008) demonstraram em seus trabalhos, através da análise da água da chuva em Florianópolis, que o pH da chuva inicial tende a ser mais ácido e que com o passar do tempo tende a neutralizar, o que pode estar relacionado com a limpeza da atmosfera. Como a coleta realizada neste trabalho ocorria sempre após o enchimento do reservatório, após o descarte da primeira fração da água da chuva, faz sentido que o pH encontrado esteja na faixa da neutralidade. Bastos (2007), Areerachakul et al. (2009) e Kim et al. (2007) em análises da água de chuva, encontraram valores de pH na faixa da neutralidade, variando de 6 a 9, o que demonstra conformidade com os valores encontrados nesta pesquisa.

Pode-se observar através da Figura 20 que não há grande diferença entre o pH da água afluyente à filtração (água do reservatório) para o permeado, visto que o tratamento por microfiltração não tende a alterar este parâmetro. Jacques (2005) observou que a água da chuva ao escoar por telhados cerâmicos e de fibrocimento aumentava o pH, atribuindo este fato à presença de partículas depositadas na superfície dos mesmos. Nas análises realizadas neste trabalho o pH da água coletada diretamente da atmosfera esteve sempre menor que o pH da água da chuva que passou pela área de captação (telhado), confirmando a proposição do autor supracitado.

5.3.2 Alcalinidade

A alcalinidade representa a capacidade da água em neutralizar ácidos, está relacionada à presença de sais alcalinos como carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos.

A alcalinidade da água da chuva coletada diretamente da atmosfera variou de 2 a 7 $\text{mg.L}^{-1} \text{CaCO}_3$, enquanto que na água no reservatório (afluyente) variou de 9 a 20 $\text{mg.L}^{-1} \text{CaCO}_3$ e no permeado de 6 a 16 $\text{mg.L}^{-1} \text{CaCO}_3$, como pode ser observado na Figura 21. Através desses dados supõe-se que a água da chuva ao passar pelo telhado carrega consigo partículas que conferem um aumento na alcalinidade da mesma. Peters (2006) verificou que a água da chuva coletada diretamente da atmosfera apresenta um valor de alcalinidade e ao passar pelo telhado realmente sofre um aumento nesse valor, de 3,9 para 23,1 $\text{mg.L}^{-1} \text{CaCO}_3$ de alcalinidade, atribuindo esse aumento à deposição de fuligem e poeira na área de captação e à composição do material do telhado.

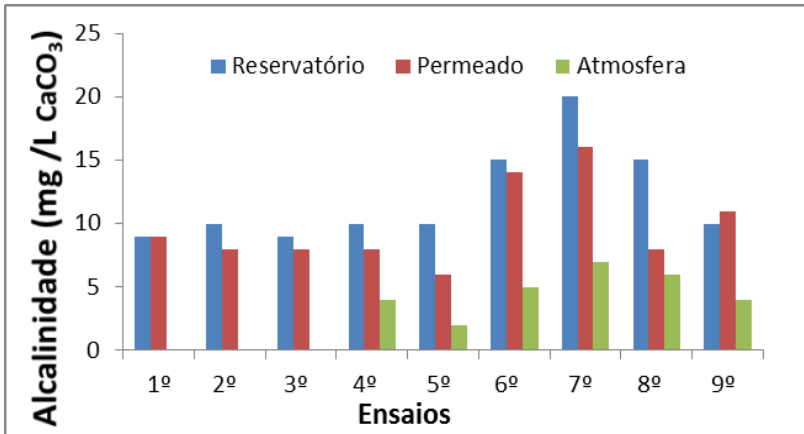


Figura 21: Variação da alcalinidade da água da chuva ao longo dos ensaios de microfiltração.

Jaques (2005) avaliou a queda da alcalinidade da água de chuva ao longo de uma precipitação, após passar por dois tipos de telhados, cerâmico e de amianto, e verificou que o telhado de amianto apresentou valores que variaram de 31,70 a 16,40 mg.L⁻¹ CaCO₃, enquanto que no telhado cerâmico tal variação foi de 9,80 a 1,70 mg.L⁻¹ CaCO₃. Essa diferença de valores entre os telhados foi atribuída à composição química do material de fabricação de cada telhado, visto que a exposição às partículas foi semelhante, concluindo que o telhado de amianto interfere mais na alcalinidade da água que escoar por ele.

Mesmo observando que a água de chuva ao cair da atmosfera tem um valor menor de alcalinidade e esta sofre um incremento ao passar pela área de captação, tal incremento não se mostrou tão acentuado a ponto de degradar a qualidade da água coletada.

Os valores da alcalinidade do permeado foram menores do que da água bruta na maioria dos ensaios, porém verificou-se que a microfiltração não exerceu influência na remoção deste parâmetro, visto que o mesmo está ligado à composição química da água. Cipriano (2004), realizou o tratamento da água de chuva em filtro de areia, não alcançando um resultado satisfatório na remoção de alcalinidade dessa água, com 12 mg.L⁻¹ CaCO₃ no afluente e 11 mg.L⁻¹ CaCO₃ após o filtro de areia, o que demonstra que a filtração não foi eficiente na remoção deste parâmetro.

5.3.3 Dureza

A dureza é uma característica da água relacionada à presença de íons, principalmente Cálcio (Ca^{+2}) e Magnésio (Mg^{+2}). A água considerada dura apresenta a característica de impedir a formação de espuma no uso do sabão, além de causar incrustações em resistências de chuveiros elétricos e em tubulações que transportam água quente. O valor máximo permitido pela Portaria 2914/2011, para a água ser considerada potável, de acordo com este parâmetro, é de $500 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$.

A dureza da água da chuva coletada diretamente da atmosfera, sem a interferência do telhado, foi baixa variando de 6 a $10 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$. Na água de chuva bruta (afluente) a dureza apresentou maiores valores variando de 25 a $58 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$. A dureza do permeado não apresentou muita diferença em relação à água bruta, variando de 20 a $55 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$, o que indica que a microfiltração não exerceu influência significativa na remoção deste parâmetro, conforme mostra a Figura 22. Pode-se observar mais uma vez que a passagem da água da chuva pelo telhado é um fator que tende a aumentar o valor do parâmetro analisado, neste caso a dureza. Porém, mesmo depois de passar pelo telhado os valores da dureza da água da chuva não ultrapassaram o limite máximo permissível estipulado pela Portaria 2914/2011, o que mostra que a água da chuva pode ser considerada potável, em termos de dureza.

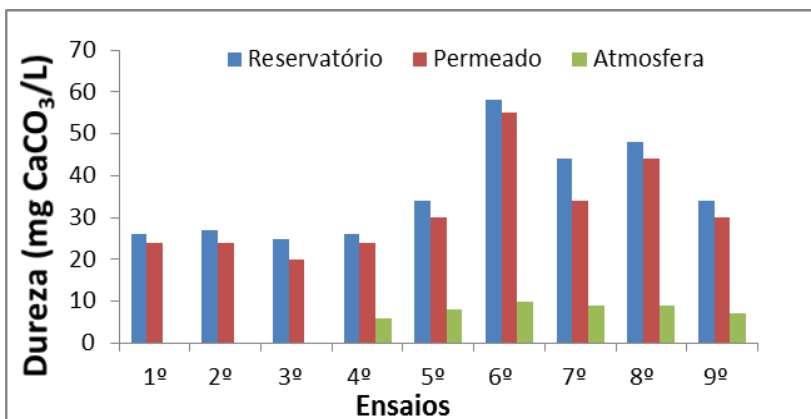


Figura 22: Variação da dureza da água da chuva ao longo dos ensaios de microfiltração.

Annechini (2005) encontrou resultados parecidos em seu estudo em Vitória (ES), onde a dureza da água da chuva coletada diretamente

da atmosfera apresentou uma média de $8,4 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$, enquanto que a água da chuva depois de passar pela área de captação apresentou um incremento no valor passando a uma média de $19,8 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$.

Jaques (2005) analisou a influência de dois tipos de telhados na dureza da água da chuva e concluiu que o telhado de amianto provém um maior incremento deste parâmetro quando comparado ao telhado cerâmico. A alcalinidade da água coletada diretamente da atmosfera, sem a interferência da área de captação, foi de $9,3 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$, depois de passar pelos telhados de amianto e cerâmicos passou à $49,5$ e $23,9 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ respectivamente.

5.3.4 Cor

A cor na água é provocada pela presença de sólidos dissolvidos, colóides e sólidos suspensos. Na água de chuva, a cor é proveniente das partículas e matéria orgânica depositadas na área de captação. A Portaria 2914/2011 estipula o valor máximo permitido de 15 unidades de cor como padrão de potabilidade da água. A Figura 23 mostra a variação da cor da água da chuva armazenada no reservatório (afluente), depois de filtrada (permeado) e coletada diretamente da atmosfera ao longo do período de estudos.

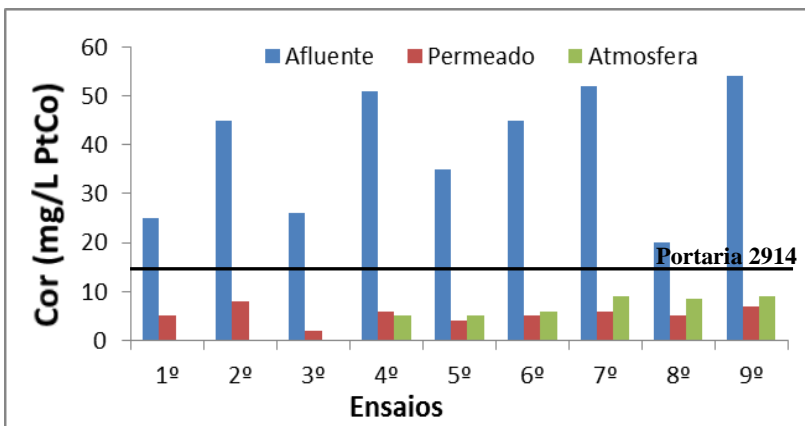


Figura 23: Variação da cor da água da chuva ao longo dos ensaios de microfiltração.

Os valores da cor da água de chuva bruta armazenada no reservatório (afluente) variaram de 25 a $54 \text{ mg.L}^{-1} \text{ PtCo}$, os quais podem

ser considerados elevados, quando comparados aos valores apresentados por outros autores. Jaques (2005) avaliando a variação da cor ao longo dos eventos chuvosos encontrou uma média de $59 \text{ mg.L}^{-1} \text{ PtCo}$, para a chuva inicial que vem carregando as impurezas da atmosfera e do telhado, já no reservatório de armazenamento a média da cor ficou em $16 \text{ mg.L}^{-1} \text{ PtCo}$. Peters (2006) em seu estudo verificou que a cor da primeira fração de chuva, a água de descarte, era em torno de $30 \text{ mg.L}^{-1} \text{ PtCo}$ e no reservatório esse valor tende a reduzir apresentando uma média de $13 \text{ mg.L}^{-1} \text{ PtCo}$. Os altos valores de cor encontrados na água de chuva armazenada no reservatório, mesmo depois do descarte, neste trabalho se deve ao fato da área de captação estar localizado próximo a grandes árvores, as quais desprendem folhas e galhos, e ainda que o período de estudo compreendeu a estação do outono, momento que a queda de folhas é acentuada. A deposição de partículas, provenientes da poluição atmosférica, na área de captação juntamente esse material orgânico (folhas e galhos), que se deteriora com o tempo, podem conferir cor à água de chuva quando a mesma escoar pelo telhado.

A Figura 24 mostra a eficiência da remoção deste parâmetro ao longo dos ensaios realizados.

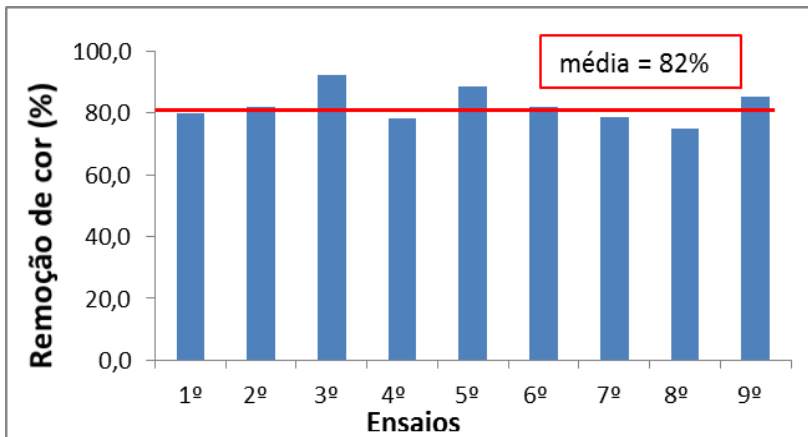


Figura 24: Eficiência do processo de microfiltração na remoção de cor na água da chuva.

A cor muitas vezes é proveniente de materiais dissolvidos, os quais não são totalmente removidos por microfiltração, porém a membrana de microfiltração proporcionou uma eficiente remoção deste

parâmetro, onde o permeado atendeu a Portaria 2914/2011, em termos de cor da água, em todos os ensaios.

A média de remoção de cor nos ensaios ficou em torno de 82%, chegando em alguns ensaios a uma remoção de 92% de cor na água de chuva. Valle, Pinheiro e Siqueira (2009), através de ensaios de microfiltração tangencial de água de chuva com membrana cerâmica de 0,2 μm , conseguiram uma remoção de cor na ordem de 98%. Kim et al. (2007) realizaram ensaios de microfiltração com água de chuva em membrana metálica de 0,5 μm , atingindo uma pequena remoção de 8% na cor, devido possivelmente ao baixo valor de cor no afluente (12 mg.L^{-1} PtCo). De acordo com as literaturas consultadas, as remoções da cor alcançadas neste trabalho podem ser consideradas satisfatórias.

5.3.5 Turbidez

A turbidez está relacionada à presença de partículas sólidas em suspensão na água. É um dos principais parâmetros a ser removido da água da chuva, proveniente de poeira, e partículas existentes na atmosfera e na área da captação, as quais são carregadas pela água da chuva.

A água da chuva coletada diretamente da atmosfera apresentou uma turbidez bem baixa, variando de 0,2 a 0,6 UNT nas coletas realizadas. A água de chuva, afluente à microfiltração, que foi coletada do telhado apresentou valores de turbidez variando de 1,0 a 3,3 UNT, demonstrando que área de captação interfere negativamente na qualidade da água da chuva. O permeado apresentou valores baixos de turbidez, variando de 0,1 a 0,25 UNT ao longo dos ensaios, o que indica que a microfiltração foi eficiente na remoção deste parâmetro. Na Figura 25 são apresentados os resultados da variação da turbidez da água de chuva coletada diretamente da atmosfera, no reservatório e do permeado.

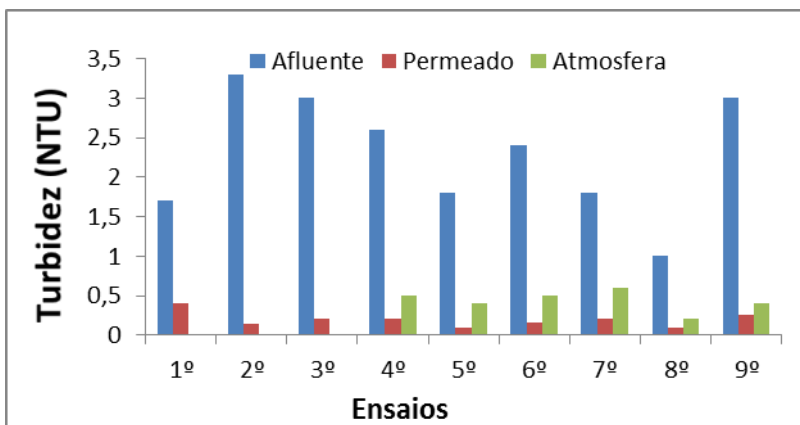


Figura 25: Variação da turbidez na água da chuva ao longo dos ensaios de microfiltração.

A Portaria 2914/2011 estipula o valor máximo permissível de 5,0 UNT como padrão de potabilidade para a água, logo se percebe que a água de chuva mesmo antes do tratamento já poderia ser considerada potável, em relação a este parâmetro, e após a microfiltração houve uma remoção significativa da turbidez, melhorando ainda mais a qualidade da água da chuva.

Peters (2006) também constatou que a água da chuva ao passar pelo telhado sofre um aumento na turbidez, encontrando valores de 1,5 UNT na água de chuva coletada diretamente da atmosfera e 2,5 UNT na água da cisterna, já com o descarte da chuva inicial.

A turbidez é um parâmetro importante na qualidade da água da chuva, visto que está relacionada com a presença de partículas sólidas orgânicas e inorgânicas presentes no ar e na área de captação. O sistema de microfiltração se mostrou eficiente na remoção deste parâmetro, com uma média de remoção de 92,3%, chegando a uma remoção de 95,8% em alguns ensaios, como é mostrado na Figura 26.

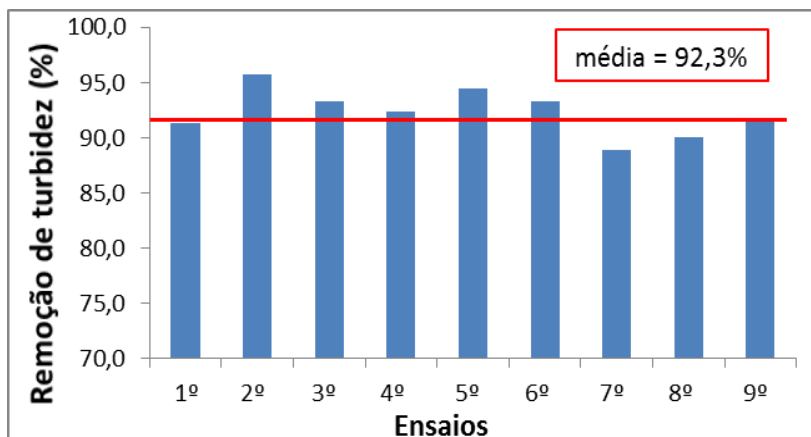


Figura 26: Eficiência do processo de microfiltração na remoção da turbidez na água da chuva.

5.3.6 Coliformes totais e termotolerantes

A água da chuva ao passar pela área de captação pode sofrer contaminação bacteriológica, devido à presença de fezes de pássaros. As análises coliformes totais indicam a contaminação por bactérias do grupo coliforme em geral, essas que podem estar presentes no solo e nas partículas do ar. A presença de coliformes termotolerantes indica que a água teve contato com fezes de animais de sangue quente, o que sugere que esta água pode estar contaminada por patógenos. Os parâmetros bacteriológicos podem ser considerados os mais importantes deste estudo, visto que na maioria dos sistemas de tratamento de água tais parâmetros são eliminados através da adição de produtos químicos, geralmente o cloro, na água e neste caso a remoção é puramente física.

A água da chuva coletada diretamente da atmosfera apresentou uma pequena concentração de coliformes totais, proveniente provavelmente de bactérias contidas no ar e não apresentou coliformes termotolerantes. Já a água da chuva coletada do telhado, afluente ao sistema de microfiltração, apresentou uma concentração elevada não só de coliformes totais como também de coliformes termotolerantes, o que indica a participação da área de captação na degradação da qualidade da água da chuva coletada. A microfiltração tangencial apresentou um ótimo desempenho na remoção dos coliformes totais e termotolerantes, conforme demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados das análises bacteriológicas (coliformes totais e termotolerantes) da água da chuva coletada diretamente da atmosfera, após passar pela área de captação e após a microfiltração.

Datas dos ensaios	Sequência dos ensaios	Coliformes Totais (NMP/100 ml)			Coliformes Termotolerantes (NMP/100 ml)		
		Atmosfera	Afluente	Permeado	Atmosfera	Afluente	Permeado
23/08/11	1º	-	2,40E+04	Ausente	-	82,8	Ausente
30/08/11	2º	-	1,70E+05	Ausente	-	750	Ausente
09/09/11	3º	-	3,40E+03	Ausente	-	300	Ausente
13/10/11	4º	24,3	2,50E+05	Ausente	Ausente	450	Ausente
16/11/11	5º	17,8	1,30E+04	Ausente	Ausente	160	Ausente
01/12/11	6º	15,6	7,30E+04	Ausente	Ausente	31,5	Ausente
07/12/11	7º	14,8	4,10E+04	Ausente	Ausente	1900	Ausente
15/12/11	8º	16,4	5,80E+04	Ausente	Ausente	2700	Ausente
25/01/12	9º	14,8	3,80E+04	Ausente	Ausente	540	Ausente

Jaques (2005) em seus estudos verificou que a água de chuva coletada diretamente da atmosfera apresentou pequena contaminação por coliformes totais e que ao passar pela área de captação houve um aumento desse parâmetro, além de incorporar contaminação por coliformes termotolerantes.

Pelegrin (2004) através de ensaios de microfiltração tangencial com efluentes pré-tratados, alcançou uma remoção total de coliformes totais e termotolerantes.

A área de captação se mostrou novamente como um fator agravante na degradação da qualidade da água da chuva, pois a contaminação por coliformes totais aumentou após a passagem da água pelo telhado e por coliformes termotolerantes só ocorreu após o escoamento da água de chuva pela área de captação.

5.4 ESTIMATIVA DE VOLUME DE CHUVA PARA CAPTAÇÃO

A precipitação em Florianópolis é bem distribuída durante o ano, com pluviosidade variando de 150 a 220 mm de Agosto a Maio e nos período de Junho a Agosto geralmente apresenta uma menor pluviosidade variando de 67 a 110 mm, de acordo com a série histórica de 10 anos fornecida pela EPAGRI (Figura 27).

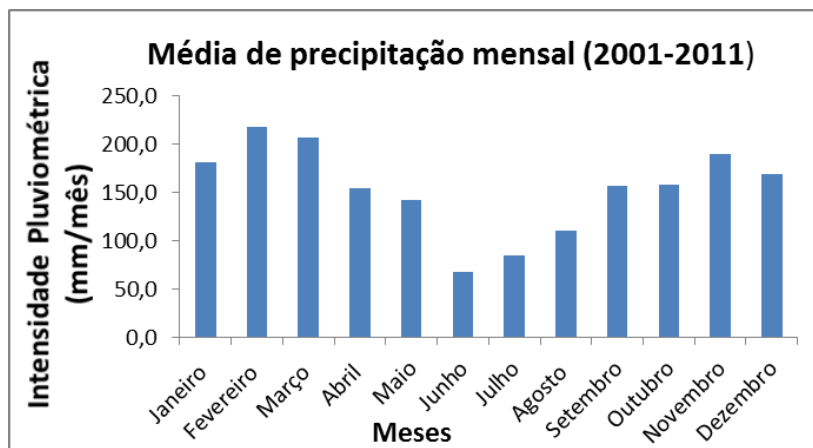


Figura 27: Média de precipitações mensais baseadas em uma série histórica de 10 anos para o município de Florianópolis.

A Figura 27 apresenta as precipitações médias de cada mês, expressas em mm ($L.m^{-2}$), que representa o volume de chuva precipitado. O volume de água de chuva escoado em uma superfície de captação, disponível para coleta, seria 80% do volume precipitado, pois o coeficiente de escoamento adotado para o telhado em questão foi 0,8 (Tomaz, 2003). O volume de chuva precipitado e o volume disponível por metro quadrado para aproveitamento é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Volumes mensais de chuva precipitados e disponíveis para captação, por metro quadrado de superfície, em Florianópolis.

Meses	Volume Precipitado ($L.m^{-2}$)	Volume Disponível ($L.m^{-2}$)
Janeiro	181,7	145,3
Fevereiro	218,1	174,5
Março	207,3	165,8
Abril	154,1	123,2
Maiο	142,1	113,7
Junho	67,2	53,8
Julho	84,7	67,8
Agosto	110,0	88,0
Setembro	156,7	125,3
Outubro	158,0	126,4
Novembro	189,5	151,6
Dezembro	169,4	135,5
Total (anual)	1838,7	1471,0

Admitindo como área de captação o telhado utilizado para coletar a água da chuva neste trabalho, que possui 100 m^2 , pode-se ter uma noção do volume de água possível de ser captado na cidade de Florianópolis durante cada mês do ano e em um ano. Tais volumes são apresentados na Tabela 7, em metros cúbicos.

Tabela 7: Relação entre o volume mensal de chuva precipitado em Florianópolis e o volume de água escoado em uma superfície de 100 m^2 .

Meses	Volume Precipitado (mm)	Volume Disponível (m³)
Janeiro	181,7	14,5
Fevereiro	218,1	17,4
Março	207,3	16,6
Abril	154,1	12,3
Maio	142,1	11,4
Junho	67,2	5,4
Julho	84,7	6,8
Agosto	110,0	8,8
Setembro	156,7	12,5
Outubro	158,0	12,6
Novembro	189,5	15,2
Dezembro	169,4	13,6
Total (anual)	1838,7	147,1

Considerando uma residência familiar hipotética de 3 pessoas, com uma demanda diária de 150 litros de água e com telhado (área de captação) de 100 m², a demanda mensal de água para esta residência é de 13.500 litros ou 13,5 m³. O volume médio mensal de água de chuva disponível para captação em Florianópolis é aproximadamente 12,0 m³, o que indica que a água de chuva praticamente supre a demanda mensal de água da residência hipotética, sendo que em alguns meses o volume disponível excede a demanda mensal. Considerando uma maior área de captação o volume disponível também aumenta. Portanto os resultados indicam que Florianópolis possui um grande potencial para aproveitamento de água de chuva, considerando sua pluviosidade mensal.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que:

- Os ensaios preliminares com água de torneira demonstraram que os parâmetros frequência e velocidade tangencial têm uma correlação positiva, assim como os parâmetros frequência e fluxo de permeado;
- Ainda nos ensaios com água de torneira, os parâmetros frequência e pressão influenciam em conjunto o fluxo do permeado, impossibilitando uma análise isolada da influência de cada um;
- O ensaio de microfiltração com água de chuva que proporcionou o fluxo mais alto foi com pressão de 1,5 Bar e frequência de 40 Hz;
- A produção de permeado na condição mais favorável ($P=1,5$ bar; $f=40\text{Hz}$) em termos de fluxo ($J_p=332,3 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$), foi de aproximadamente $43,2 \text{ L.h}^{-1}$
- O acionamento do mecanismo de *backflushing* proporcionou, em praticamente todos os ensaios, um fluxo final superior aos ensaios de microfiltração nas mesmas condições operacionais sem o acionamento do mesmo;
- Na análise do *fouling* da membrana notou-se que o *fouling* foi maior nos ensaios com maior pressão. O mecanismo de *backflushing* possibilitou uma redução na colmatação da membrana, quando comparados os resultados sem a utilização do mesmo;
- Os parâmetros pH e dureza da água de chuva coletada se mantiveram dentro dos padrões estabelecidos pela Portaria 2914/11 ao longo dos ensaios, porém não foram alterados significativamente pela microfiltração.
- As remoções de cor e turbidez, principais parâmetros relacionados com a presença de sólidos e partículas na água, foram eficientes alcançando remoções médias de 80 e 92% respectivamente.
- A remoção de coliformes totais e termotolerantes foi total (100%), demonstrando o potencial da microfiltração na eliminação de bactérias das águas.
- O sistema proposto no tratamento da água de chuva apresentou uma ótima eficiência, proporcionando um permeado de

qualidade compatível com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, nos parâmetros analisados;

- A área de captação se mostrou como um fator agravante na degradação da qualidade e contaminação da água da chuva, demonstrando a necessidade de considerar alternativas para a redução dessa contaminação;
- Através da análise de precipitações em Florianópolis, verificou que o município possui chuvas bem distribuídas durante o ano e que sua pluviosidade anual é favorável para o aproveitamento da água de chuva;
- Com a captação da água de chuva em um telhado hipotético de 100 m² é possível atender a demanda total de água de uma residência de médio padrão, com 3 pessoas, em boa parte do ano.

7. RECOMENDAÇÕES

- Estudos relacionados ao fluxo e condições operacionais do piloto devem ser explorados com mais profundidade, visando uma integração satisfatória entre frequência, pressão, fluxo e qualidade do permeado.
- A análise de mais parâmetros qualitativos na água da chuva de Florianópolis possibilitaria um painel mais preciso da qualidade da mesma, visto que existe um aumento da frota veicular local e consequentemente um aumento na contaminação química da atmosfera.
- Avaliar a viabilidade de implantação do sistema em escala real, pois o alto custo do equipamento de microfiltração ainda representa um fator limitante na utilização de tal tecnologia.
- Estudar outros tipos de membranas de custo mais baixo e menor custo operacional;
- Realizar estudos de tratamento de água de chuva com outros tipos de tecnologia, buscando integrar eficiência com custo baixo.

8. REFERÊNCIAS

AL-MALACK, M.H.; ANDERSON, G.K. Use of crossflow microfiltration in wastewater treatment. **Water Research**. Vol 31, N° 12, p. 3064-3072, 1997.

ALVARENGA, J. A. **Avaliação da formação de subprodutos da cloração em água para consumo humano**. 2010, p. 120. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

ANDRADE NETO, C. O. **Segurança Sanitária das Águas de Cisternas Rurais**. In: 4º Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva. Anais. Juazeiro, 2003.

ANNECCHINI, K. P. V. **Aproveitamento da água da chuva para fins não potáveis na cidade de Vitória (ES)**. 2005, 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2005.

APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. 21ª ed. Washington: American Public Health Association, 2005.

AREERACHAKUL, N.; KITIPHATMONTREE, M.; KANDASAMY, J.; KUS, B.; DUANGDUEN, C.; PIVSA-ART, S.; VIGNESWARAN, S. Submerged membrane system with biofilter as a treatment to rainwater. **Water Air Soil Pollut.** v. 9, 431-438p. Focus, 2009.

ASA BRASIL – ARTICULAÇÃO NO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO. Disponível em:
http://www.asabrasil.org.br/Portal/Informacoes.asp?COD_MENU=1150
. Acessado em: 13/02/2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Tanques sépticos – unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – projeto, construção e operação: NBR 13.969**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Água de Chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas**. NBR 15.527. Rio de Janeiro, 2007.

AZEVEDO NETO, J.M., Aproveitamento de Águas de chuva para Abastecimento. **BIO**. Ano III, No. 2, p 44-48, ABES, Rio de Janeiro, 1991.

BALAKRISHMAN, M.; DUA, M.; KHAIRNAR, P.N. Significance of membranes type and feed stream in the ultrafiltration of sugar juice. **Journal of Separation Science and Technology**. v.36. n.4. 619-637p. 2001.

BASTOS, P. B. **Tratamento de água de chuva através de filtração lenta e desinfecção UV**. 2007, 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2007.

BELLI, T. J **Biorreator à membrana em batelada sequencial aplicado ao tratamento de esgoto visando a remoção de nitrogênio total**. 2011. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009. p. 177-231.

CAMPELLO, F. **Nitrificação e Pré-desnitrificação em sistema de tratamento de esgoto sanitário utilizando biorreator à membrana submersa visando reúso**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

CETESB – Companhia de tecnologia de Saneamento Ambiental. **Guia de Coleta e Preservação de Amostras de Água**. 1ª ed. 155 p. São Paulo, 1987.

CETESB – Companhia de tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo**. 2003.

CHERYAN, M. **Ultrafiltration and Microfiltration Handbook**. Lancaster: Technomic Publishing Company, 1998. 527 p.

CIPRIANO, R.F.P. **Tratamento das águas de chuva escoadas sobre telhado e avaliação do seu uso**. 2004. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Regional de Blumenau. Blumenau, SC, 2004.

COSTA, A. C. M. **Desenvolvimento de membranas de osmose inversa resistentes à deposição de matéria orgânica e bioincrustações**. 122 p. Tese de doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

DEBON, J. **Emprego da microfiltração tangencial na obtenção de leite fermentado prebiótico**. 2009. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

DIAS, T. **MBR: nova tecnologia para tratamento de efluentes**. Disponível em: <http://www.meiofiltrante.com.br/>. Acessado em 16/02/2011.

FAGUNDES, G. R.; CALIARI, P. C. Desenvolvimento de sistema simplificado de potabilização de águas pluviais para unidades de pequeno consumo. In: 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Recife: ABES, 2009.

FENDRICH, R.; OLIYNIK, R. **Manual de utilização das águas pluviais: 100 Maneiras Práticas**. Curitiba: Livraria do Chain Editora, 2002.

FORNARO, A. **A chuva ácida em São Paulo: Caracterização química de amostras integradas e sequenciais de deposição úmida**. 1991. 119 p. Dissertação (Mestrado em Química Fundamental). Instituto de Química, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991.

FORNARO, A.; FONTENELE, A.P.G.; PEDROTTI, J. Avaliação de metais traços e íons majoritários em águas de chuva na cidade de São Paulo. **Química Nova**. v. 32, n. 4, p.839-844, 2009.

GÉSAN-GUIZIOU, G.; BOYAAVAL, E.; DAUFIN, G. Critical stability conditions in crossflow microfiltration of skimmed milk: transition to irreversible deposition. **Journal of Membrane Science**. v.158, p.211-222, 1999.

GHANAYEM, M. Environmental considerations with respect to rainwater harvesting. In: Rainwater International Systems. **Manheim: Proceedings**. Germany, 2001.

GONÇALVES, R. F. **Uso Racional da água em edificações**. Vitória: ABES, 2006.

GROUP RAINDROPS. **Aproveitamento de Água de Chuva**. Curitiba, 2002

HABERT, A.C.; BORGES, C.P.; NOBREGA, R. **Processos de Separação por Membranas**. Escola Piloto em Engenharia Química – COPPE/UFRJ. E-papers Serviços Editoriais. 2006. 180p.

JAQUES, R. C. **Qualidade da água de chuva no município de Florianópolis e sua potencialidade para aproveitamento em edificações**. 2005, 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

JONES, A.J. **Factors affecting the operation and maintenance of biosand filters for rainwater treatment in developing countries**. 2007. 146p. Dissertation. (Master of Science in Civil Engineering) University of Arkansas. Arkansas, United States, 2007.

KASTER, B. **Efeito das condições operacionais na microfiltração do suco de maçã**. 2009, 83p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

KIM, R. H.; LEE, S.; JEONG, J.; LEE, J. H.; KIM, Y. K. Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane. **Desalination**. V. 202, p. 326-332, 2007.

KROMKAMP, J.; RIJNSENT, S.; HUTTENHUIS, R.; SCHROËN, K.; BOOM, R. Differential analysis of deposition layers from micellar casein and milk fat globule suspensions onto ultrafiltration and microfiltration membranes. **Journal of Food Engineering**. v.80, p.257-266, 2007.

LISBOA, M. B. **Estudo de viabilidade econômica da implantação de um sistema de aproveitamento da água de chuva em uma escola pública no município de Seara-SC**. 2008. (Trabalho de Conclusão de Curso) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

MANAHAM, S. E. **Environmental Chemistry**. 8 ed., CRC Press: Boca Raton, 2005.

MARTINS, R. F. **Avaliação da qualidade das águas de chuva de Florianópolis, Tubarão, Crisciúma e São Martinho, com ênfase na caracterização das influências marinhas e continentais simuladas utilizando o modelo HYSPLIT**. 2008, 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

MAY, S. **Caracterização, tratamento e reúso de águas cinzas e aproveitamento de águas pluviais em edificações**. 2009, 223 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

MAY, S. **Estudo da viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações**. 2004, 189p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering – Treatment and Reuse**. 1819 p. Fourth Edition, New York, 2003.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria N° 518 de 25 de março de 2004**. Disponível em: http://www.agrolab.com.br/portaria%20518_04.pdf. Acessado em: 19/11/2010.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria N° 2914 de 12 de Dezembro de 2011**. Disponível em:

http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Portaria_MS_2914-11.pdf.
Acessado em: 13/02/2012.

MULDER, M. **Basic principles of membrane technology**. 551 p. The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1997.

NASCIMENTO, J. F. **Avaliação de membranas de osmose inversa no tratamento de águas de purga de torres de refrigeração de indústria petrolífera com finalidade de reuso**. Dissertação de mestrado (Pós-Graduação em Química) Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2004.

NISHI, L. **Estudo dos processos de coagulação/floculação seguido de filtração com membranas para remoção de protozoários parasitas e células de cianobactérias**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2011.

NOBREGA, R., BORGES, C.P., HABERT, A.C. Processos de separação por membranas. In: JUNIOR, A.P., KILIKIAN, B.V. **Purificação de produtos biotecnológicos**. Editora Manole Ltda, São Paulo, 2005. p37-88.

PALMIER, L.R. A necessidade de bacias experimentais para a avaliação da eficiência de técnicas alternativas de captação de água na região semi-árida do Brasil. In: 3º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMI-ÁRIDO. Paraíba, 2001. Anais. ABRH, p.8, 2001.

PAULSON, D.J.; WILSON,R.L.; SPATZ,D.D. Crossflow membrane technology and its applications. **Food Technology**. v.12, p.77-87, 1984.

PELEGRIN, D. C. **Microfiltração tangencial de efluente sanitário após tratamento biológico**. 2004. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

PETERS, M. R. **Potencialidade de uso de fontes alternativas de água para fins não potáveis em uma unidade residencial**. 2006. p. 109. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

PHILLIPI, L. S.; VACCARI, K. P.; PETERS, M. R.; GONÇALVES, R. F. Aproveitamento da água de chuva. In: GONÇALVES, R. F. (coord.). **Uso Racional da água em edificações**. Vitória: ABES, 2006. p. 73-152.

PIZZOLATTI, B. S. **Avaliação dos métodos de desinfecção: Cloração e Radiação Ultravioleta, com a finalidade de utilização da água de chuva em escala residencial**. (Trabalho de Conclusão de Curso) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

PNUMA – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **Informativo do comitê brasileiro do programa das nações unidas para o meio ambiente**. Disponível em: www.pnuma.org.br. Acessado em: 03/08/2011.

POKRYWIECKI, J. C. **Fracionamento do óleo essencial de manjerição de cheiro (ocimum basilicum) com membranas em meio supercrítico para concentração do linalol com reciclo do solvente no processo de extração**. Tese de Doutorado (Pós- Graduação em Engenharia Química) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

PORTER, M.C. **Handbook of Industrial Membrane Technology**. New Jersey: Noyes Publications, 1990. 604p.

PRESSWOOD, W. G.. The membrane filter: Its history and characteristics. In: DEKKER, M., **Membrane Filtration: Applications, Techniques and Problems**. p. 1-14, New York, 1981.

REBOUÇAS, A. C. **Água no Brasil: abundância, desperdício e escassez**. Bahia Análise & Dados. 2003. Vol. 13, nº especial. 341-345p.

RIBEIRO, E. N.; JÚNIOR, W. C. S.; URRUCHI, W. M. I.; LEITE, A. F.; NOLASCO, M. A. Implementação do tratamento de água de chuva com tecnologia de ozônio no aeroporto internacional de São Paulo (AISP). In: 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Recife: ABES, 2009.

RIPPERGER, S. and ALTMANN, J. Crossflow microfiltration – State of the Art. **Separation and Purification Technology**. 26 p.19-31, 2002.

SCHISTEK, H. A cisterna de tela e cimento. In: 3º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMI-ÁRIDO. Paraíba, 2001. Anais. ABRH, p.10, 2001.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso.** 234 p. São Paulo: ABES, 2001.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009. p. 35-40

SILVEIRA, F. A. **Viabilidade Técnica para o aproveitamento da água da chuva em Rio Negrinho/SC.** 2008. (Trabalho de Conclusão de Curso) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

SONDA, C. et al. A convivência da mulher com o semi-árido: A vida antes e depois das cisternas. In: 3º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMI-ÁRIDO. Paraíba, 2001. Anais. ABRH, p.8, 2001.

SONDHI, R.; LIN, Y. S.; ALVAREZ, F. Crossflow filtration of chromium hydroxide suspension by ceramic membranes: fouling and it's minimization by backpulsing. **Journal of membrane Science.** nº 174 p.111-122, 2000.

SPERLING, M. von. **Introdução à qualidade da água e ao tratamento de esgotos.** Vol. 1, DESA, UFMG. 2005. 442p.

THOMAS, T. Escolha de cisternas para captação de água de chuva no sertão. In: 3º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMI-ÁRIDO. Paraíba, 2001. Anais. ABRH, p.7, 2001.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de água de chuva: Aproveitamento de água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis.** São Paulo: Navegar. 2003.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de água de chuva em áreas urbanas e fins não potáveis**. São Paulo, 2009.

TUCCI, C.E.M.; HESPAHOL, I.; NETTO, O.M.C. Cenários da gestão da água no Brasil: uma contribuição para a “visão mundial da água”. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. 2000. Vol. 5, nº 3. 31-43p.

VALLE, J. A. B.; PINHEIRO, I. G.; SIQUEIRA, H. M. Microfiltração de água de chuva utilizando membrana cerâmica. In: 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Recife: ABES, 2009.

VARBANETS, M. P.; ZURBRUGG, C.; SWARTZ, C.; PRONK, W. Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology. **Water Research**. v. 43, p. 245-265, 2009.

VASUDEVAN, P.; PATHAK, N. **Domestic Rainwater Harvesting: A literature review**. Centre for rural development & technology. Indian Institute of Technology, Delhi, India. 2005.

VIDAL, C.M.S. **Avaliação da microfiltração tangencial como alternativa de tratamento avançado de efluente gerado em sistema de tratamento esgoto sanitário constituído de UASB (Upflow Sludge Anaerobic Blanket) seguido de tanque de aeração**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

VILLIERS, M. **Água: Como o uso deste precioso recurso natural poderá acarretar a mais séria crise do século XXI**. Rio de Janeiro: Ediouro. 2002.